

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-124697

(43)Date of publication of application : 11.05.2001

(51)Int.Cl.

G01N 21/63

B23K 26/00

F02C 7/00

G01J 5/60

(21)Application number : 2000-233806

(71)Applicant : GENERAL ELECTRIC CO <GE>

(22)Date of filing : 02.08.2000

(72)Inventor : TRANTOW RICHARD LLOYD
SUH UI WON

(30)Priority

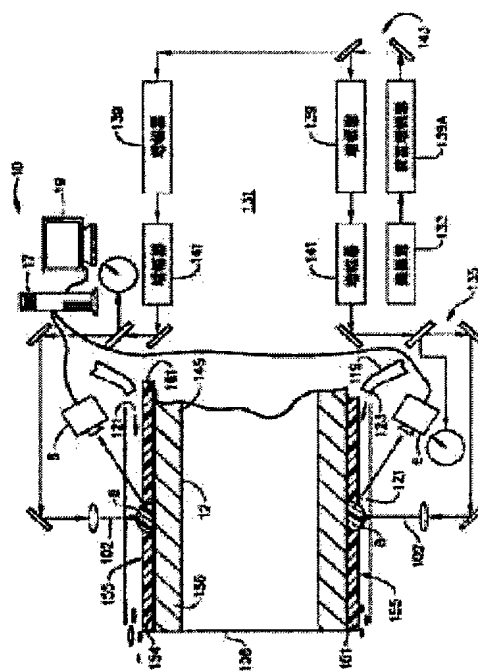
Priority number : 1999 365887 Priority date : 03.08.1999 Priority country : US

(54) MONITORING AND CONTROL METHOD FOR LASER IMPACT PEENING USING SUCCESSIVE PLASMA LIGHT SPECIAL ANALYSIS

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method for quality control and inspection capable of inexpensively, precisely and quickly inspecting a product under manufacturing by nondestructive evaluation of laser impact peening work without depending on a method using a test piece after working.

SOLUTION: A laser beam 102 is emitted to the coating surface 155 of a workpiece 108, and the optical spectrum of generated plasma 8 is subjected to high-speed line scan spectrometry by use of a streak camera 6. This is transmitted to an analyzing computer 17 to analyze the form of the energy spectrum, and the result is compared with a prescribed light spectrum forming the criterion related to high cycle fatigue characteristic for the quantity of the workpiece, whereby the quality inspection is performed.



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2001-124697
(P2001-124697A)

(43) 公開日 平成13年5月11日 (2001.5.11)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
G 0 1 N 21/63		G 0 1 N 21/63	A
B 2 3 K 26/00		B 2 3 K 26/00	E
F 0 2 C 7/00		F 0 2 C 7/00	D
G 0 1 J 5/60		G 0 1 J 5/60	Z

審査請求 未請求 請求項の数24 O L 外国語出願 (全 50 頁)

(21) 出願番号 特願2000-233806(P2000-233806)

(22) 出願日 平成12年8月2日 (2000.8.2)

(31) 優先権主張番号 09/365887

(32) 優先日 平成11年8月3日 (1999.8.3)

(33) 優先権主張国 米国 (U S)

(71) 出願人 390041542

ゼネラル・エレクトリック・カンパニイ
GENERAL ELECTRIC CO
MPANY

アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネ
クタデイ、リバーロード、1番

(72) 発明者 リチャード・ロイド・トラントウ

アメリカ合衆国、オハイオ州、シンシナテ
ィ、ボーク・バレー・レーン、11815番

(72) 発明者 ウィー・ウォン・シュー

アメリカ合衆国、オハイオ州、シンシナテ
ィ、アレンハースト、10910番

(74) 代理人 100093908

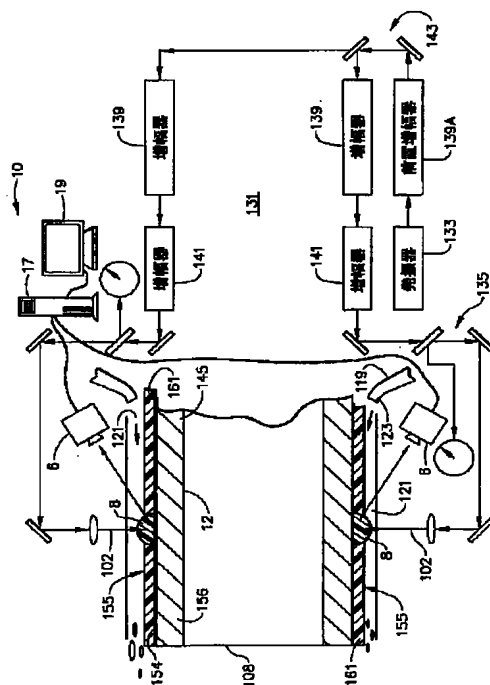
弁理士 松本 研一

(54) 【発明の名称】 経時プラズマ光スペクトル解析を用いたレーザー衝撃ピーニングの監視及び制御方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 加工後の試験片を用いた方法によらず、製造中の生産物の安価・正確且つ迅速なレーザー衝撃ピーニング加工の非破壊評価法による品質管理検査方法を提供すること。

【解決手段】 被加工物 108 の被覆表面 155 にレーザービーム 102 を照射し、発生するプラズマ 8 の光スペクトルをストリークカメラ 6 による高速ラインスキャン分光測定を行う。これを解析用コンピュータ 17 に送りエネルギースペクトルの形を解析し、それを被加工物の場合についての高サイクル疲労特性と関連づけた基準となる所定の光スペクトルと比較することによって品質検査を行う。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 生産加工物のレーザー衝撃ピーニングプロセスの品質管理検査方法であって、下記段階：

(a) 加工物に付随した金属表面にレーザー衝撃ピーニング装置から 1 以上のレーザービームパルスを照射し、ある持続時間をもったプラズマを形成する段階であって、レーザー衝撃ピーニングプロセスで与えられる深い圧縮残留応力をもった領域をプラズマが上記表面下に生じさせる段階、

(b) プラズマの持続期間内の複数の時点でプラズマの放射する複数の発光スペクトルをそれぞれ測定する段階、及び

(c) 上記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布を、加工物を合格又は不合格とするための合否基準と比較する段階を含んでなる方法。

【請求項 2】 前記金属表面が生産加工物上にあり、相関関係が、前記生産加工物と実質的に同じ試験片でしかも前記レーザー衝撃ピーニング装置と同一又は類似のレーザー衝撃ピーニング装置でレーザー衝撃ピーニング加工した試験片での高サイクル疲労試験に基づく、請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】 前記合否基準が、前記複数の発光スペクトルのうちの類似エネルギー相対分布と高疲労破壊データとの相関関係である、請求項 1 記載の方法。

【請求項 4】 前記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布が、前記期間内の経時的な黒体放射ピーク強度波長分布であり、該ピーク強度波長分布が、前記複数の発光スペクトルの各々についてピーク強度波長を求めることによって得られ、さらに前記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布を比較する段階が、上記ピーク強度波長分布の黒体放射ピーク強度波長データを、加工物を合格又は不合格とするための合否基準と比較する段階を含む、請求項 1 記載の方法。

【請求項 5】 前記合否基準が、ピーク強度波長試験データと加工物を合格又は不合格とするための高サイクル疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 4 記載の方法。

【請求項 6】 前記合否基準が、ピーク強度波長試験データと加工物を合格又は不合格とするための低サイクル疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 4 記載の方法。

【請求項 7】 前記合否基準が、前記プラズマの持続時間にわたり積算したピーク強度波長試験データと加工物を合格又は不合格とするための高サイクル疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 4 記載の方法。

【請求項 8】 前記試験片の各々が、同一又は類似のレーザー衝撃ピーニング装置でレーザー衝撃ピーニング加工した試験片の各レーザー衝撃ピーニング領域に、破壊を早める傷を有する、請求項 7 記載の方法。

【請求項 9】 前記金属表面が、生産加工物の材料と同一又は類似の材料でできた金属クーポン上にある、請求項 1 記載の方法。

【請求項 10】 生産加工物のレーザー衝撃ピーニングプロセスの品質管理検査方法であって、下記段階：

(a) 生産加工物の表面にレーザー衝撃ピーニング装置から複数のレーザービームパルスを照射し、複数のプラズマを形成する段階であって、各々のパルスについてある持続時間をもつ各プラズマが、レーザー衝撃ピーニングプロセスで与えられる深い圧縮残留応力をもった領域を表面下に生じさせる段階、

(b) プラズマの持続期間内の複数の時点で上記複数のプラズマの少なくとも一部のプラズマの各々が放射する複数の発光スペクトルをそれぞれ測定する段階、及び

(c) 各プラズマの複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布を、加工物を合格又は不合格とするための合否基準と比較する段階を含んでなる方法。

【請求項 11】 前記合否基準が、前記複数の発光スペクトルにおける類似エネルギー相対分布と高疲労破壊データとの相関関係である、請求項 10 記載の方法。

【請求項 12】 前記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布が、前記期間内の経時的な黒体放射ピーク強度波長分布であり、

該ピーク強度波長分布が、前記複数の発光スペクトルの各々についてピーク強度波長を求めることによって得られ、さらに前記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布を比較する段階が、前記ピーク強度波長分布の黒体放射ピーク強度波長データを、加工物を合格又は不合格とするための合否基準と比較する段階を含む、請求項 10 記載の方法。

【請求項 13】 前記合否基準が、ピーク強度波長試験データと加工物を合格又は不合格とするための高疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 12 記載の方法。

【請求項 14】 前記合否基準が、前記プラズマの前記持続時間にわたり積算したピーク強度波長試験データと加工物を合格又は不合格とするための高疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 12 記載の方法。

【請求項 15】 前記試験片の各々が、同一又は類似のレーザー衝撃ピーニング装置でレーザー衝撃ピーニング加工した試験片の各レーザー衝撃ピーニング領域に、破壊を早める傷を有する、請求項 14 記載の方法。

【請求項 16】 ガスタービンエンジンの生産動翼のレーザー衝撃ピーニングプロセスの品質管理検査方法であって、

(a) 生産動翼の各々に付随した金属表面にレーザー衝撃ピーニング装置から 1 以上のレーザービームパルスを照射し、ある持続時間をもったプラズマを形成する段階であって、レーザー衝撃ピーニングプロセスで与えられる深い圧縮残留応力をもった領域をプラズマが上記表

面下に生じさせる段階、

(b) プラズマの持続期間内の複数の時点でプラズマの放射する複数の発光スペクトルをそれぞれ測定する段階、及び

(c) 上記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布を、生産動翼を合格又は不合格とするための合否基準と比較する段階を含んでなる方法。

【請求項 17】 前記金属表面が生産動翼の各々にあり、相関関係が、該生産動翼と実質的に同じ試験動翼でしかも同一又は類似のレーザー衝撃ピーニング装置でレーザー衝撃ピーニング加工した試験動翼での高サイクル疲労試験に基づく、請求項 16 記載の方法。

【請求項 18】 前記合否基準が、前記複数の発光スペクトルにおける類似エネルギー相対分布と前記試験動翼の高疲労破壊データとの相関関係である、請求項 16 記載の方法。

【請求項 19】 前記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布が、前記期間内の経時的な黒体放射ピーク強度波長分布であり、該ピーク強度波長分布が、前記複数の発光スペクトルの各々についてピーク強度波長を求めることによって得られ、さらに前記複数のスペクトルにおけるエネルギー相対分布を比較する段階が、上記ピーク強度波長分布の黒体放射ピーク強度波長データを、生産動翼を合格又は不合格とするための合否基準と比較する段階を含む、請求項 16 記載の方法。

【請求項 20】 前記合否基準が、ピーク強度波長試験データと生産動翼を合格又は不合格とするための前記試験動翼の高サイクル疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 19 記載の方法。

【請求項 21】 前記合否基準が、ピーク強度波長試験データと生産動翼を合格又は不合格とするための前記試験動翼の低サイクル疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 19 記載の方法。

【請求項 22】 前記合否基準が、前記プラズマの前記持続時間にわたり積算したピーク強度波長試験データと生産動翼を合格又は不合格とするための前記試験動翼の高サイクル疲労破壊試験データとの相関関係である、請求項 19 記載の方法。

【請求項 23】 生産動翼及び試験動翼の前記金属表面が、少なくともその動翼の前縁の一部に沿っていて、各試験動翼が、同一又は類似のレーザー衝撃ピーニング装置でレーザー衝撃ピーニング加工した試験動翼の各レーザー衝撃ピーニング領域に、破壊を早める傷を有する、請求項 22 記載の方法。

【請求項 24】 前記破壊を早める傷が、試験動翼の前縁の一部に設けられたノッチである、請求項 23 記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、金属表面のレーザー表面処理の品質保証に用いられるプロセス監視方法に関するものであり、具体的には、レーザー生成プラズマの発光スペクトル強度をその持続時間にわたって測定することによってレーザー衝撃ピーニング (LSP) プロセスの品質保証を与える方法に関する。

【0002】

【従来の技術】レーザー衝撃ピーニングは、レーザー衝撃加工とも呼ばれ、加工物の表面をレーザー衝撃ピーニングすることによって深い圧縮残留応力を付与した領域を生じさせる方法である。レーザー衝撃ピーニングは、通例、「Altering Material Properties」と題する米国特許第 3850698 号、「Laser Shock Processing」と題する米国特許第 4401477 号及び「Material Properties」と題する米国特許第 5131957 号に開示された方法と同様、加工物の表面に強烈な衝撃波を生じさせるため高出力パルスレーザーからの 1 つ以上の放射パルスを用いる。レーザー衝撃ピーニングとは、当技術分野で理解されかつ本明細書で用いる通り、レーザービーム源からのパルスレーザービームを利用して、表面の薄層又は表面のコーティング (例えば、テープ又は塗料) の瞬間的なアブレーション又は気化によってレーザービームの衝突点に爆発的な力を発生させることにより、その表面に強い局部的圧縮力を生じさせることを意味する。

【0003】レーザーピーニングは加工物の外表面に圧縮応力を加えた保護層を生成するのに利用されており、かかる保護層は、「Laser Peening System and Method」と題する米国特許第 4937421 号に開示されている通り、加工物の疲労破壊に対する耐性を大幅に高めることが知られている。かかる方法では、通例、加工品の上を流れる水のカーテン、或いは封じ込めプラズマ媒質を与えるその他の方法を用いる。こうした媒質によってプラズマは迅速に衝撃波圧力に達することができ、塑性変形及びそれに付随した残留応力パターンを生ずるが、この塑性変形と残留応力パターンが LSP 効果をなす。

【0004】レーザー衝撃ピーニングは、ガスタービンエンジン分野の数多くの用途向けに開発されており、その幾つかはいずれも本願出願人に譲渡された「On The Fly Laser Shock Peening」と題する米国特許第 5756965 号、「Laser shock peened gas turbine engine fan blade edges」と題する米国特許第 5591009 号、「Technique to prevent or divert cracks」と題する米国特許第 5569018 号、「Distortion control for laser shock peened gas turbine engine compressor blade edges」と題する米国特許第 5531570 号、「Laser shock peened rotor components for turbomachinery」と題する米国特許第 5492447 号、「Adhesive tape covered laser shock peening」と題

する米国特許第5674329号、及び「Dry tape covered laser shock peening」と題する米国特許第5674328号に開示されている。これらの用途だけでなく他の用途でも、レーザー衝撃ピーニングを用いた生産工程の効率的な品質保証評価法が必要とされている。

【0005】レーザー衝撃ピーニングプロセスの開発は、「Laser shock peened gas turbine engine fan blade edges」と題する米国特許第5591009号及び「Distortion control for laser shock peened gas turbine engine compressor blade edges」と題する米国特許第5531570号に開示されているように、ファン及び圧縮機の翼形部及び動翼の前縁及び後縁の正圧面と負圧面を同時にLSP加工するために行われてきた。片側をショットピーニング加工したアルメンストリップは、ショットピーニング品質管理の分野で良く知られており、米国特許第2620838号を参照されたい。しかし、アルメンストリップは一回のレーザービーム衝撃の効果の尺度を与えるようには設計されていない。LSPプロセスでは、高パルスエネルギー・短パルス幅レーザーシステムを用いる必要がある。高エネルギーと短パルス幅の組合せ並びに（例えば水-気界面での）ビーム経路の安定性のバラツキのため、加工中の部品に加えられた真の（校正された）エネルギーを知るうえでの電子測定システムの有用性が限られる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】従前用いられてきたレーザー衝撃ピーニング品質保証法の一つは、前縁をLSP加工した後検査前にLSP加工域にノッチを付けた動翼の高サイクル疲労（HCF）検査である。この方法は試験片を破壊するもので、実施には相当な費用と時間がかかるだけでなく、LSP加工部品の生産及び品質保証プロセスを大幅に遅らせる。HCF検査は無作為抽出法であり、統計的品質測定法としては不十分である。LSPプロセスの非破壊評価（NDE）であってしかも安価で正確で迅速な測定及び管理のための改良品質保証法があれば非常に望ましい。また、比較的安価で、加工物の犠牲的抽出標本に間接的に用いる代わりに実際の加工物に直接用いるに足る経済性をもったNDE品質保証法があれば望ましい。LSPは、あらゆる生産技術と同様、機械を必要とし、時間と経費を要するプロセスである。そのため、生産機械の量又は複雑さ及び／又は生産時間を低減できる技術であればどんなものでも非常に望ましい。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明は、レーザー衝撃ピーニングプロセスに用いられる一回のレーザー照射の持続時間にわたってレーザーで発生したプラズマの発光の瞬間的スペクトル強度を測定する。本発明では、好ましくは、浜松ホトニクス（株）から市販されているストリークカメラ等の光学装置を用いた気化材料の瞬間的

スペクトルの解析によってプラズマの瞬間的光強度を測定する。

【0008】加工物の生産用レーザー衝撃ピーニングプロセスの品質管理方法は、生産用レーザー衝撃ピーニングプロセスの間に照射した個々のレーザー衝撃ピーニング用レーザーショットで気化した材料の付随プラズマの持続時間にわたり短時間で瞬間的スペクトル光強度を測定し記録する段階を含む。次に、記録したスペクトルの経時データを解析して瞬間的黑体プラズマスペクトルを求め、解析したスペクトルから経時的なプラズマ温度を解析し、次いで、解析したプラズマ温度を用いて生産用レーザー衝撃ピーニングプロセスの統計的管理を行う。

【0009】瞬間的光スペクトルの解析からの生産結果を用いて、生産用レーザー衝撃ピーニングプロセスが条件を満足しているか否かを決定する。本発明の方法の一実施形態では、瞬間的光スペクトルの解析からの生産結果を、生産加工物と同一又は類似の試験加工物であって同一又は類似するレーザー衝撃ピーニングでレーザー衝撃ピーニング加工した試験加工物の高サイクル疲労試験に基づく高サイクル疲労破壊の試験結果と瞬間的光スペクトルの解析との相関関係と比較する。さらに具体的な実施形態では、試験加工物の各々は、同一又は類似のレーザー衝撃ピーニングでレーザー衝撃ピーニング加工した試験片のレーザー衝撃ピーニング領域内に破壊を早める傷を有する。

【0010】ある例示的实施形態では、生産加工物は翼形を有するガスタービンエンジン動翼であり、試験加工物はレーザー衝撃ピーニング加工斑にノッチを付けた翼形を有するガスタービンエンジン動翼であり、ノッチは翼形部をレーザー衝撃ピーニング加工した後で設けられる。相関関係を求めるための瞬間的光スペクトルの解析は、翼形試験加工物のマルチパルスレーザー衝撃ピーニング加工斑の形成時の各レーザーパルスについて行われる。

【0011】本発明の一実施形態における相関関係は、レーザー照射で形成されるプラズマの放射する発光スペクトルをプラズマの発生からその短い寿命を終えるまでに測定して、そのスペクトルを古典的黑体スペクトルの形に統計的にフィットさせたものである。別の実施形態では、対象物にLSP加工領域を作り出す個々のLSP事象で得られる生産結果の解析を、生産用レーザー衝撃ピーニングプロセスの適否を決定するための生産結果の解析で与えられる次元と疲労寿命の拡大期間とを関連づける統計的フィットデータと対比する。

【0012】利点

本発明の利点は数多くあり、レーザー衝撃ピーニングプロセスで品質保証検査を行う際の費用、時間、人手及び複雑さが減ること等が挙げられる。本発明の別の利点は、インプロセス品質管理（in-process quality control）を提供することであり、レーザー衝撃ピーニング加工

中に、その加工現場で、加工作業とリアルタイムに実際の生産部品について品質保証検査を行うことができる。本発明は、レーザー衝撃ピーニング加工時に品質保証検査を行うための中断時間を大幅に減らすのに役立つ。本発明は、現在QAに使われているノッチ付高サイクル疲労検査の冗長で費用と時間のかかる方法に代わるものとなる。QAは、実際の部品つまり加工物と共に実施でき、再現性が高く、レーザー衝撃ピーニングのQA法として信頼性が高い。

【0013】本発明はその他にも生産上の利点を有しており、例えば、レーザービームが集束用光学機器及びビームステアリング用光学機器を通過して気/水界面を通過する前の、ビームの焦点及びエネルギー分布が変わってエネルギーが失われてしまうようなレーザーの原エネルギーを測定するのではなく、レーザーエネルギーの測定を部品上で測定する。本発明は、各プラズマの持続時間にわたって定性的効果を迅速かつ正確に測定する。本発明の測定装置は加工現場近くに設けて頻繁に利用することができ、リアルタイムの結果を与える。本発明は、本発明の再現性の高さ並びに検出器の光学機器に捕捉される光の量には依存しないことから、信頼性が高く正確なQA法を提供する。

【0014】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照しながら、本発明の上記の態様及びその他の特徴について詳細に説明する。

【0015】本発明は、図1に示すレーザー衝撃ピーニング加工班12を有する生産ファン動翼108（その全体は図7及び図8に示してある）で例示される生産加工物に用いられるレーザー衝撃ピーニングプロセスの品質管理のための品質保証法を提供する。品質保証は、通例、進行又は停止、合格又は不合格、承認又は拒絶式の検査又は解析である。本発明の方法及び技術は、米国特許第5492447号、同第5674329号、同第5674328号及び同第5591009号に開示されているような航空機ターボファンガスタービンエンジンファン動翼その他の金属材料製の物品のような生産加工物でのレーザー衝撃ピーニングプロセスの品質保証に関する。本発明の方法は、好ましくは各々の加工物のレーザー衝撃ピーニング加工時又は加工後に、或いは、一群の加工物がレーザー衝撃ピーニングされる前後に行うことができる検査である。好ましくは、本発明の方法はすべてのレーザー照射で検査を行う。

【0016】図1に、レーザー衝撃ピーニング加工面154のレーザー衝撃ピーニング領域（斑ともいう）12内に照射するレーザービーム102であり、レーザー衝撃ピーニング加工面154は、米国特許第5674329号及び同第5674328号に開示されているような塗料又は接着性テープ等のアブレーティブコーティング161で被覆され、被覆面155を形成している。塗料

又はテープはアブレーティブ媒質を提供するが、好ましくはその表面は透明な封じ込め媒質（水121の流れのような透明な流体カーテンとし得る）で覆われる。アブレーティブコーティング161は各々の照射でアブレーションしてプラズマ8を発生し、ひいては、レーザー衝撃ピーニングプロセスの検査に使用し得る動翼その他の対象物の金属材料表面に衝撃波をもたらす。塗料の好適な代替物として、その他のアブレーティブ材料を用いて表面を被覆してもよい。かかる被覆物材料には、米国特許第5674329号及び同第5674328号に開示されているような金属箔又はプラスチック接着テープがある。

【0017】衝撃波は、流水カーテン121によって被覆表面155に向かって反転し、レーザー衝撃ピーニングすべき対象物の被覆表面下に衝撃波（強烈な圧力波）を発生させる。かかる衝撃波の振幅、波形及び数によって、LPS加工の結果生じる塑性変形の度合並びに得られる残留圧縮応力の深さ及び強度が決まる。アブレーティブコーティングは、標的表面を保護するとともにプラズマ8を発生させるために用いられる。一つの例示的応用例では、レーザービーム衝撃で誘起される深い圧縮残留応力（圧縮応力が加わった領域156での）は概して約50～150kpsi（キロポンド/平方インチ）であり、レーザー衝撃ピーニング面154からプレストレスト領域156内部に約20～70ミルの範囲の深さに達する。

【0018】図1には、レーザー衝撃ピーニング加工時のレーザービーム102の一回の照射で発生するプラズマ8の経時光強度を測定するシステム10の例示的实施形態の概略図も示してある。システム10を用いて得られたスペクトルの経時的強度データから導き出される結果を用いて、レーザー衝撃ピーニングプロセスの品質管理のための品質保証法を実施する。ストリークカメラ6その他超高速ラインスキャン分光計等の手段を用いて、レーザービーム102の照射によるプラズマ8の持続期間内の所定期間PTの様々な時点でプラズマ8の放射する光スペクトル（図2に示す）の経時スペクトル測定を行う。

【0019】ストリークカメラ6はスペクトル光強度データを経時的に記録して、データをデータ解析用のコンピュータ17に送り、結果をモニタ19に表示する。コンピュータを用いて、プラズマ持続時間内の極く短時間（レーザーパルス立ち上がり時間5ナノ秒では1ナノ秒程度の長さ）でのスペクトルにおけるエネルギーの相対分布を表すエネルギースペクトルの形を解析する。エネルギースペクトルの一般化した形状を図2に示すが、光強度を波長の関数としてグラフにした発光スペクトルを示す。プラズマの発する光スペクトル像は、ライン構造とスペクトル全体に分布する一般化バックグラウンドの双方を含んでいることが予想される。これらの2つのモー

ド間に分配されるエネルギーの相対比は、検出器のスペクトル分解能にある程度左右される。分解能に劣るほど、ライン構造は一般バックグラウンドに融合されてしまう。黒体放射体については、白熱源のスペクトルエネルギー分布は図3に示す形をとる。ライン構造が完全に融合されるか否かにかかわらず、エネルギー分布は、黒体放射体の場合と同様にスペクトルの高エネルギー側（短波長側）にピークをもつ。このピークは、温度の上昇に伴ってスペクトルの短波長側に移動する。本発明の一実施形態では、実施に当たり、部分的に融合したスペクトルデータを理想化黒体スペクトルにフィットさせたものを用いて、プラズマの全持続時間にわたる有効黒体温度（瞬間的圧力に関連する）を求める。生産工程に際して、測定した光スペクトルデータを、好ましくは加工物の合否についての高サイクル疲労と関連づけられた所定の光スペクトル基準と比較する。

【0020】この所定の基準は、好ましくは、図9に示すようなレーザー衝撃ピーニング加工したノッチ付試験動翼109で例示される試験加工物の高サイクル疲労データと光スペクトル試験データとの相関関係に基づく。

【0021】図7及び図8を参照すると、生産ファン動翼108は、動翼プラットホーム136から動翼先端138まで半径方向外側に延在する翼形部134と、該プラットホーム136から半径方向内側に延在する根元部140を含んでいる。根元部140は、動翼シャंक144でプラットホーム136とつながる翼根部142を有する。翼134は、翼の前縁LEと後縁TEとの間で弦方向に延びる。翼形部134の翼弦CHは、図8に示すような動翼の各断面での前縁LEと後縁TEの間の線である。翼形部134の正圧面146は矢印Vで示す概略回転方向と反対側に面しており、負圧面148は翼形部の反対側にあり、翼形中心線MLは概して翼弦方向にこれら両側面の間の中央に設定される。

【0022】生産ファン動翼108は、翼形部134の前縁LEに沿って動翼プラットホーム136から動翼チップ138まで延在する前縁部150を有する。前縁部150は所定の第1幅Wを有し、エンジン作動中に翼形部134の前縁に沿って欠け傷や裂け傷が生じかねない領域が含まれる。翼形部134は、エンジン作動中にファン動翼108の回転によって生ずる遠心力のため、非常に大きな引張応力場に付される。翼形部134はエンジン作動中に発生する振動も受け、欠け傷や裂け傷は高サイクル疲労応力増大因子として作用してその周囲にさらに応力集中を引き起こす。

【0023】欠け傷や裂け傷から成長し拡大する危険性のある亀裂線に沿った動翼部分の疲労破壊に対抗すべく、レーザー衝撃ピーニング加工班12は、初期欠け傷や裂け傷が高サイクル疲労による動翼破壊を引き起こしかねない前縁LEの一部に沿って設けられる。レーザー衝撃ピーニング加工班12は、例示的な所定の破壊第1

モード線LMの起点となり得る前縁LEの部分に沿って設けられる。レーザー衝撃ピーニング加工班12内で、正圧面146と負圧面148の少なくとも一方、好ましくは双方を同時にレーザー衝撃ピーニングして、両側に第1及び第2のレーザー衝撃ピーニング加工動翼面154a及び154bを形成するとともに、図8にみられる通り、レーザー衝撃ピーニング(LSP)で付与された深い圧縮残留応力がレーザー衝撃ピーニング加工面から翼形部134内部に至るプレストレスト動翼領域156a及び156bを形成する。図示したプレストレスト動翼領域156a及び156bは前縁部150の一部にしかないが、所望とあれば前縁LE全体に及んでいてもよいし、その部分を延長してもよい。

【0024】本発明の品質保証法は生産動翼108のレーザー衝撃ピーニング加工時に行われ、好ましくは、レーザー衝撃ピーニング加工班12形成中の各レーザー照射毎に行う。別法として、QA検査は、レーザー衝撃ピーニングプロセス対照データを与えるため、一群の生産動翼108のレーザー衝撃ピーニング加工の前及び／又は後に犠牲動翼又はクーポンで実施してもよい。好ましくは、光スペクトルの経時測定は、生産ファン動翼108用に用いたのと同じレーザー衝撃ピーニング加工装置プロセスパラメータ、ビーム特性及び材料を用いて、レーザービーム102の照射毎に発生する各プラズマ8で行う。これによって、生産ラインの作業者は、加工物の生産工程全体に与える影響を最小限に止めながら、生産加工物の一部又は全部のリアルタイムでの品質保証検査にこの方法を用いることができる。

【0025】レーザー衝撃ピーニングプロセスの有効性評価を提供するため、レーザー衝撃パッチ内での各レーザーショットのスペクトルの経時特性及びそれらのショットの空間位置と、この方法で加工した動翼の疲労寿命との相関関係を明らかにする。相関関係を明らかにするため、レーザー衝撃ピーニング用の試験レーザー衝撃ピーニング加工面154を用いる。試験レーザー衝撃ピーニング加工面154は、好ましくは加工物と同じタイプの対象物上にあり、この実施形態では、試験動翼109である。別法として、図11に示す通り、生産加工物と同じ材料及び同じ方法で調製つまりコーティングした試験クーポン110も使用できる。これら測定は、好ましくは、相関関係を求めるためのレーザー衝撃ピーニングと生産用レーザー衝撃ピーニングとで同じようにして行われる。

【0026】レーザー衝撃ピーニングプラズマの発光スペクトルの一般的形状を、光波長に対する光強度として図2に示す。ストリークカメラ6を用いると、具体的なスペクトルの詳細をプラズマ8の持続時間内に捕捉し得る。光エネルギーは、離散ライン構造の形で現れるものと、連続した黒体放射体様分布として現れるものとに分けて示してある。これら2つの形態間でのエネルギー

一の相対分布は、プラズマ内の温度、圧力及び時間によって変化する。エネルギーの相対分布は検出器のスペクトル分解能の変化によっても変化するであろう。分解能が劣るほど、ライン構造は一般黒体様分布に融合される。本発明の好ましい実施形態では、プラズマの瞬間的10 温度を求めるため、ある時間にわたって得たプラズマの瞬間的スペクトルデータを、エネルギーの黒体放射分布及び温度にフィットさせたものを用いる。ただし、特定のプロセスパラメータの下で特定の犠牲的プロセス材料を用いて発生したスペクトルに基づく黒体様エネルギー分布も、瞬間的温度を求めるのに用いることができる15 である。離散輝線 24 の相対的強度もプラズマ温度を明らかにするのに用いることができる。なお、本発明では黒体放射分布は、黒体様エネルギー分布、実測した黒体放射分布及び理想化黒体エネルギー分布を始めとする本明細書に記載の様々な形態の黒体放射分布を包含して意味する。

【0027】好ましくは、離散輝線 24 は、図 3 に示す通り、黒体放射曲線 20 によって解析スペクトルを黒体関連成分に制限するためスペクトル像平面を選択的にマスキングすることによってブロックされる。離散輝線 24 は、ほぼスペクトル像平面で部分透過性物理フィルタによりフィルタリングし得るし、或いは、図 1 に示すコンピュータ 17 を用いてコンピュータアルゴリズムによりフィルタリングしてもよい。その逆も真なりで、(上述の) スペクトルの不要な部分のマスキング又は狭周波数帯域通過フィルタリングのいずれかによって、所望の個々の輝線を選択的に通過させることもできる。

【0028】ピーク温度決定のため理想化黒体エネルギー分布のフィットを求めるのに、黒体様スペクトル全体を得る必要はない。幾つかの具体的に選択されたスペクトル箇所(波長)内の光強度を数点測定すれば、ピーク温度及び圧力の決定には十分であろう。

【0029】図 4 に、プラズマ 8 の持続期間内の期間 P T 内の 1 番目から 11 番目の時点 T1 ~ T11 でのプラズマの放射する瞬間的光スペクトルの代表例として、一連の仮想黒体様放射曲線 20 を例示する。なお、これらの曲線は処理したスペクトルデータ又はデータを黒体様関数にフィットしたものであり、各時点での各々の曲線について、1 番目~第 11 番目の発光スペクトルのそれぞれのピーク強度点 P11 ~ P111 が存在する。

【0030】図 5 は、プラズマの黒体様スペクトルのピーク強度波長 L 並びにプラズマ温度 T 及びプラズマ圧力 P が、プラズマ 8 の持続期間 P T の時間内に経時的にどのように変化するかを示すものである。これらのパラメータの経時スペクトル関数又は曲線又は分布は、ストリークカメラ 6 で測定した発光スペクトルから導き出される。本発明の一実施形態では、これらのパラメータ曲線又は分布の一つを、生産時の品質保証のための相関関数として用いる。ストリークカメラ 6 で測定した測定発光

スペクトルから温度の値や圧力の値を導き出すのは難しいが、黒体又は黒体様の関数にスペクトルデータをフィットさせて求めた黒体又は黒体様スペクトルピーク強度波長 L は、それ以上複雑な計算を必要としない。プラズマ圧力の経時的測定は、疲労寿命との相関関係の明確化に用いるのに望ましい関係であるが、圧力の正確な測定値を導き出すのに必要とされる様々な計算及び実証的研究はそのコストに見合わない。

【0031】好ましい相関関数又は曲線は、図 5 に示すプラズマ 8 の持続期間内の短い時間 P T におけるスペクトルピーク強度波長 L、プラズマ温度 T 又はプラズマ圧力 P の 3 つのパラメータ関数又は曲線のいずれかについて、時間積算したパラメータ関数又は曲線である。相関関数又は相関曲線は上記 3 つのパラメータ曲線のいずれからも導き出すことができ、パラメータ関数又は曲線をプラズマ 8 の持続期間内の期間 P T にわたって積算することによって時間積算関数又は曲線が得られる。

【0032】図 6 に示したのは積算スペクトルピーク強度波長曲線 A1 であり、本発明の一実施形態の相関関係を得るための解析の一段階を示す。関連付け試験は、好ましくは、高サイクル疲労(HCF)試験で得られるような疲労破壊に至るまでのサイクル数に基づく。本発明の例示的实施形態では、ノッチ付試験動翼 109 をレーザー衝撃ピーニングし、その際、レーザービーム 102 の照射毎に数ナノ秒のプラズマ持続時間内の様々な時点(例えば 5 ~ 20 の測定点)でプラズマ 8 の光スペクトル(図 2 に示す)の経時測定を行う。次に、照射毎又はレーザービームスポット毎に、図 6 に示すような積算ピーク強度波長曲線 A1 を計算する。これで図 12 に示す複数 B の積算スペクトルピーク強度波長曲線が得られるが、この曲線を次にレーザー衝撃ピーニング生産工程に用いた図 13 に示すような相関曲線又は関数として直接用いるか、或いはかかる相関曲線又は関数を導き出すのに用いる。生産加工物のレーザー衝撃ピーニング生産工程時に、同じスペクトル測定値及び解析を用いて生産用積算スペクトルピーク強度波長曲線を得て、複数 B の積算スペクトルピーク強度波長曲線又は合否基準を用いて複数 B の曲線から導き出した品質保証に関する相関関係と対比する。

【0033】試験片又は試験動翼 109 は、好ましくは、実際の生産ファン動翼 108 と同じ方法で製造し、試験動翼 109 をレーザー衝撃ピーニング加工してバッチ 12 を形成した後でノッチ 152 を加える。複数 B の積算スペクトルピーク強度波長曲線群を得た後、或いは、ストリークカメラからの原スペクトルデータを記録し保存した後、試験動翼 109 を破壊に至るまでその第 1 モード周波数で振動させる。相関関係を明らかにするには、多数の試験動翼 109 又は一個だけの試験動翼 109 にノッチを加えて高サイクル疲労試験に付してもよい。ノッチ 152 は、破壊を早める傷の代表的なもので

あり、動翼をレーザー衝撃ピーニング加工した後の前縁 LE におけるプレストレスト動翼領域 156a 及び 156b の所定位置に設けられる。好ましくは、ノッチ 152 は第 1 モード線 LM のような所定モード線に集中させる。動翼を励振する強制作用の時間幅及び振幅についての基準又は試験基準を満足していれば、合格であり、その複数 B の積算スペクトルピーク強度波長曲線の各々が生産工程時の品質保証検査に相関曲線として用いられる。生産レーザー衝撃ピーニングのパラメータが変わらない限り、全生産工程で一度の較正を用いることができると考えられる。代替の実施形態では、相関関係試験を、低サイクル疲労 (LCF) によって発生する疲労破壊に至るまでのサイクル数に基づくものとする。

【0034】レーザー衝撃ピーニング生産工程時のスペクトル解析は、関連付けについての上記の説明と同一であるが、解析すべき時点及び波長の数はそれほど多くない。数点をコンピュータ 17 を用いて解析し、相関関係に対してスクリーン 19 に表示すれば、生産速度の低下を最小限にできる。

【0035】図 12 に示したのは、生産加工物の合否検査のための上限と下限の間の合格範囲又は帯域を有する相関関係の一つである。レーザービームフルエンスの変動のようなレーザー衝撃ピーニングプロセスにおける変動を用いて、図 12 に示す複数 B の積算スペクトルピーク強度波長曲線からの相関関係の試験及び展開の間に、積算スペクトルピーク強度波長の上限 AU 及び下限 AL 並びに積算スペクトルピーク強度波長平均 AM を確立することができる。次にこれを、レーザー衝撃ピーニング生産工程時に用いる図 13 に示すような導出相関曲線又は関数として用いる。別法として、理想的補正曲線からの統計的偏差を解析して生産加工物の合否の判断に使用することができる。生産工程中のスペクトルカメラ 6 によるプラズマの光強度測定から測定・導出された積算スペクトルピーク強度波長曲線の実データは、好ましくは、各々の動翼についてのリアルタイム QA 検査のためにスクリーン 19 に表示される。

【0036】図 10 及び図 11 に示したのは、生産ファン動翼 108 をレーザー衝撃ピーニングするためのレーザー衝撃ピーニングシステム 101 である。生産ファン動翼 108 は固定具 88 に取り付けられ、固定具 88 は Huffman Corporation (事務所所在地: 米国サウスカロライナ州 29710、クロバー、ハフマンウェイ 1050) から市販の 5 軸コンピュータ数値制御 (CNC) マニピュレータ 127 に装着される。例示の実施形態で示す 5 軸の動きは、CNC 機械加工で周知の慣用の並進軸 X、Y 及び Z 並びに慣用の回転軸 A 及び C である。マニピュレータ 127 は、好ましくは生産ファン動翼 108 を移動させて適所に配置するのに用いられ、レーザー衝撃ピーニング法及び本発明のレーザー衝撃ピーニング法による「オン・ザ・フライ式 (on the

fly)」レーザー衝撃ピーニングを行う。マニピュレータ 127 は、本発明の一実施形態による「オン・ザ・フライ式」レーザー衝撃ピーニングを行うために、動翼を連続的に移動して配置するのに用いられる。レーザー衝撃ピーニングは、塗料又はテープをアブレーティブ媒質として用いる多種多様な方法で実施し得る (特に「Adhesive tape covered laser shock peening」と題する米国特許第 5674329 号を参照)。生産動翼 108 及び試験動翼 109 の前縁 LE のパッチ 12 のレーザー衝撃ピーニングプロセスには同じレーザー衝撃ピーニング装置を用いる。

【0037】定置高出力レーザービーム 102 を流水カーテン 121 を通して被覆表面 155 に漸進的に照射してレーザー衝撃ピーニング加工円形スポット 158 を重ね合わせて形成しながら、生産ファン動翼 108 を連続的又は漸進的に移動させる。生産ファン動翼 108 は、好ましくは、生産工程と関連付けのための HCF 検査工程とで、同様にしてレーザー衝撃ピーニングする。水カーテン 121 は、慣用の給水管 119 の端部で慣用水ノズル 123 で供給されるものとして示してある。レーザー衝撃ピーニングシステム 101 は、発振器 133 及び前置増幅器 139A をもつ慣用ジェネレータ 131 と前置増幅レーザービームを 2 つのビーム光学伝送回路に送るビームスプリッター 143 と有しており、この 2 つのビーム光学伝送回路は各々第 1 増幅器 139 及び第 2 増幅器 141 を有しているとともに、被覆表面 155 上にレーザービーム 102 を伝送し焦点を合わせる光学素子を含んだ光学装置 135 を有している。レーザー衝撃ピーニングシステム 101 を変更・制御してレーザービーム 102 が被覆表面 155 に制御された状態で照射されるように、制御装置 124 を用いることができる。アブレーションしたコーティング材料は、流水カーテン 121 によって洗い流される。

【0038】図 11 は、生産工程及び較正工程の双方で実際の加工物又は代表的加工物を使用する代替例を示す。動翼又は加工物が生産される生産工程における様々な時間において 1 以上の試験クーボン 110 にパッチ 12 を形成する。例えば工程の最初に相関曲線を得るのに同じタイプのクーボンを使用し、しかる後に、レーザー衝撃ピーニング加工してノッチを加えた動翼を HCF 破壊に関して試験して図 12 及び図 13 に示す相関曲線及び関数を確立する。

【0039】重要な点として、レーザービーム 102 の位置が固定されたままであればカメラ 6 は固定しておくことができ、マニピュレータ 127 が生産ファン動翼 108 の向きを変え、移動させる。この特徴は、本発明の使い易さに関して大変重要であり、本発明の方法では相対的スペクトル光強度データ (特にピーク強度波長) を用いることによるものである。

【0040】本発明の原理を説明するため本発明の好ま

しい実施形態について説明してきたが、特許請求の範囲に記載された本発明の技術的範囲を逸脱せずに上記の好ましい実施形態に様々な変更又は修正を加えることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 レーザー衝撃ピーニング（LSP）プロセスで発生したプラズマから放射される光の経時的スペクトル強度の測定システムの例示の実施形態を示す概略図。

【図 2】 図 1 の測定システムで測定された所定の時点におけるプラズマの発光スペクトルを示す例示的グラフ。

【図 3】 図 2 の発光スペクトルから離散輝線を取除いた、図 2 から理想化した黒体放射を示す例示的グラフ。

【図 4】 図 1 のプラズマ持続期間内にシステムで測定された幾つかの時点での黒体放射を示す例示的グラフ。

【図 5】 図 1 のプラズマ持続期間における黒体スペクトルピーク強度波長の経時変化を、プラズマ温度及びプラズマ圧力の 2 つの仮想プロットと共に示した例示的グラフ。

【図 6】 図 1 のプラズマ持続期間内の時間について積算したスペクトルピーク強度波長及び該積算ピーク波長強度とレーザー衝撃ピーニング効果の大きさ（曲線をフィットさせるためスケールを変更してある）との関係を示す例示的グラフ。

【図 7】 図 1 のファン動翼の斜視図。

【図 8】 図 7 の 8-8 線に沿ったファン動翼の断面図。

【図 9】 本発明の例示的方法で用いるノッチ付ファン動翼の斜視図。

【図 10】 本発明の例示の実施形態によるレーザー衝撃ピーニングシステムに載置された図 1 の動翼の概略斜視図。

【図 11】 本発明の代替実施形態によるレーザー衝撃ピーニングシステムに載置された図 1 の動翼を模擬した試験クーボンの概略斜視図。

【図 12】 図 6 にその一つを示す試験データを用いて作成した複数の積算スペクトルピーク強度波長曲線の例示的グラフ。

【図 13】 図 12 に示す複数の積算スペクトルピーク強度波長曲線から導き出された導出相関曲線の例示的グラフ。

【符号の説明】

6 ストリークカメラ
8 プラズマ
10 システム
12 パッチ
17 コンピュータ
19 モニタ
20 黒体放射曲線
24 輝線

88

101

102

108

109

110

119

121

123

10 124

127

131

133

134

135

136

138

139

139 A

140

141

142

143

144

146

148

150

152

154

30 154 a

154 b

155

156

156 a

156 b

158

161

A1

AU

40 AL

AM

CH

L

LM

ML

P

PT

T

V

50 T1 ~ T11

固定具

レーザー衝撃ピーニングシステム

レーザービーム

生産ファン動翼

ノッチ付試験動翼

試験クーボン

給水管

流水カーテン

水ノズル

制御装置

マニピュレータ

ジェネレータ

発振器

翼形部

光学装置

動翼プラットフォーム

動翼先端

第 1 増幅器

前置増幅器

根元部

第 2 増幅器

翼根部

ビームスプリッター

動翼シャック

正圧面

負圧面

前縁部

ノッチ

レーザー衝撃ピーニング加工面

第 1 レーザー衝撃ピーニング動翼面

第 2 レーザー衝撃ピーニング動翼面

被覆表面

プレストレスト領域

第 1 プレストレスト動翼領域

第 2 プレストレスト動翼領域

円形スポット

アブレーティブコーティング

積算スペクトルピーク強度波長曲線

積算スペクトルピーク波長の上限

積算スペクトルピーク波長の下限

積算スペクトルピーク波長平均

翼弦

ピーク強度波長

第 1 モード線

翼形中心線

プラズマ圧力

持続期間

プラズマ温度

回転方向

1 番目 ~ 第 11 番目の時点

17

18

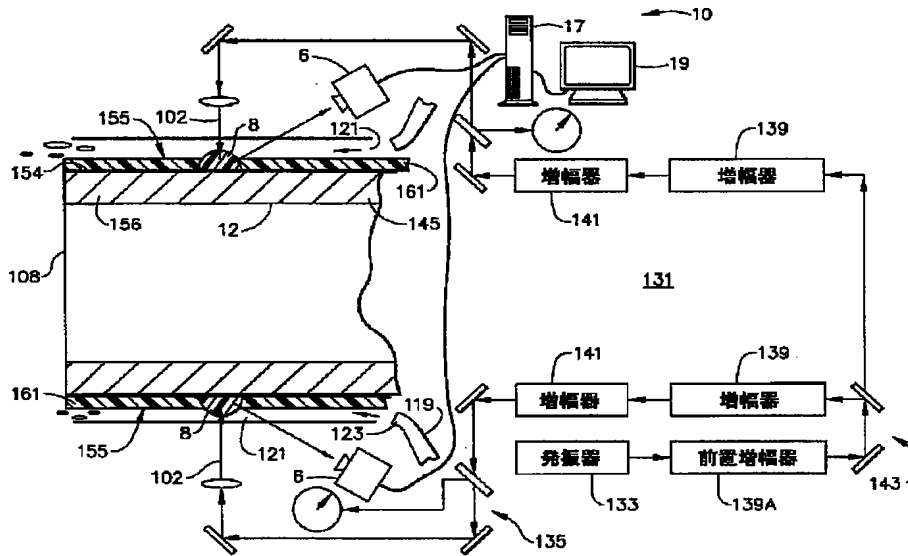
P11~P111
度点

1 番目~11 番目のピーク強

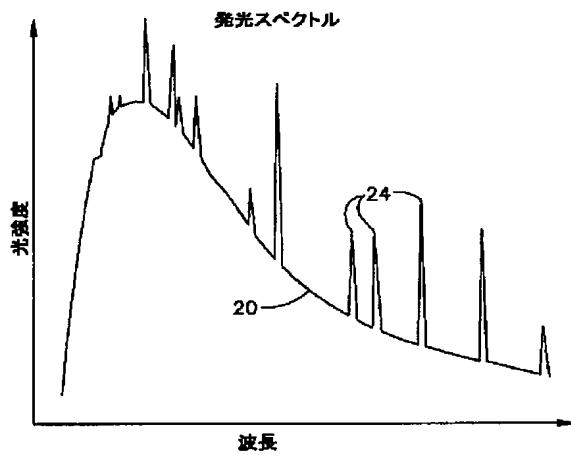
LE
TE

前縁
後縁

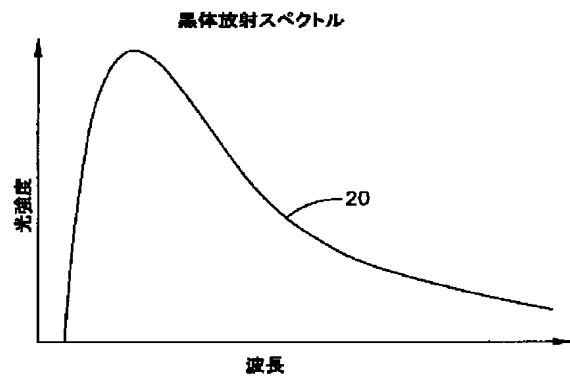
【図1】



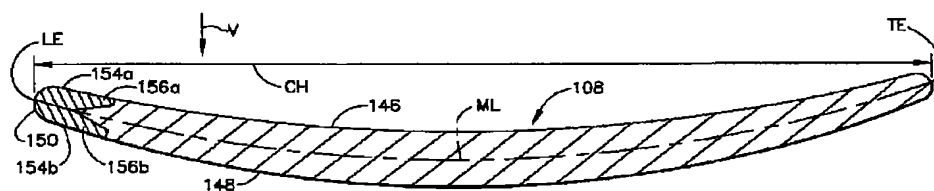
【図2】



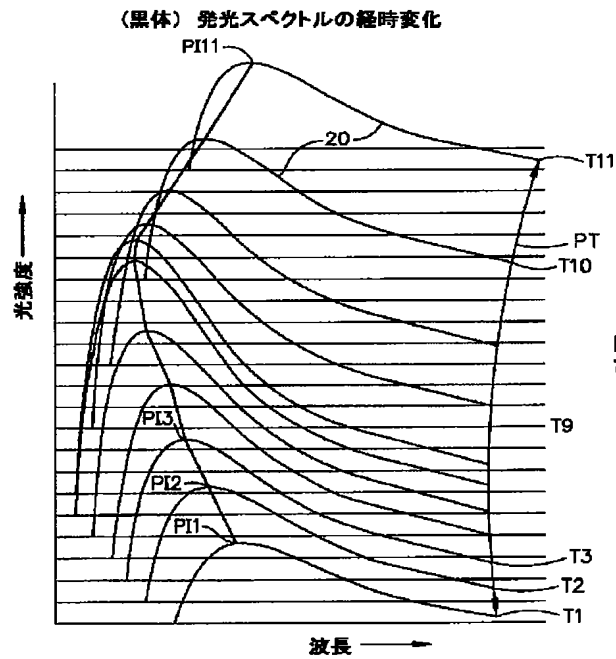
【図3】



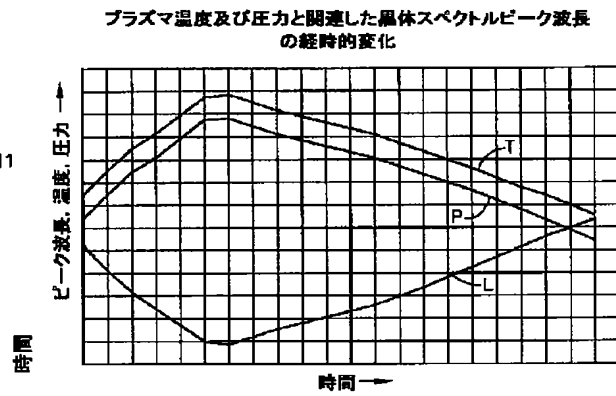
【図8】



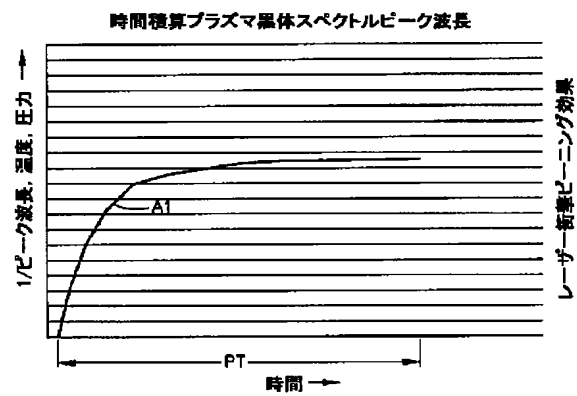
【図4】



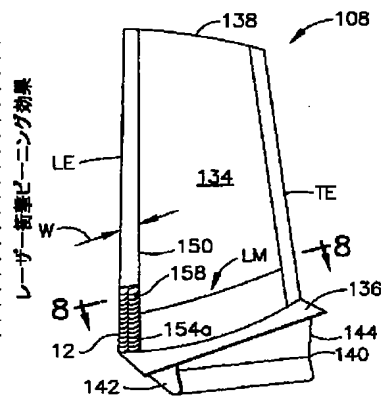
【図5】



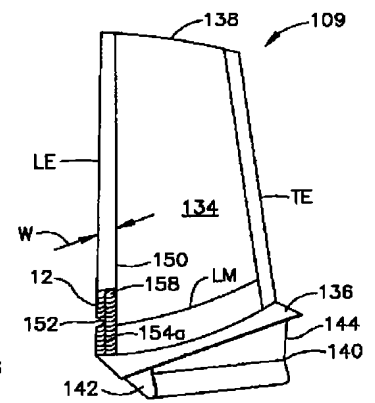
【図6】



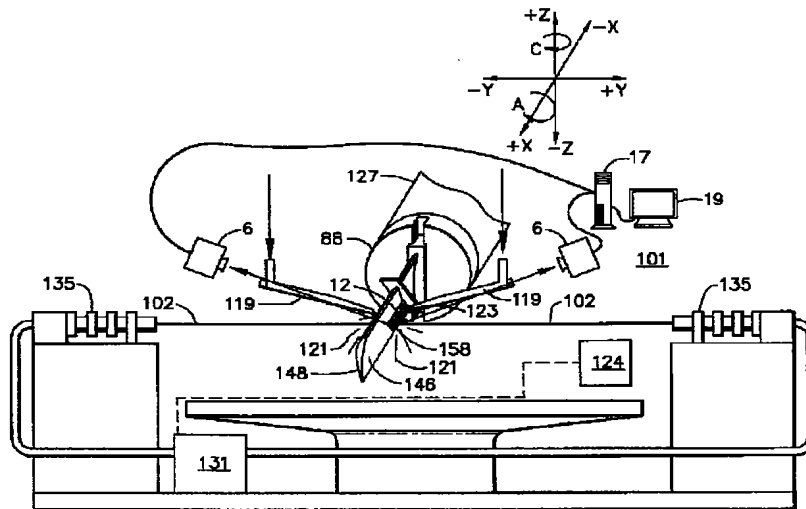
【図7】



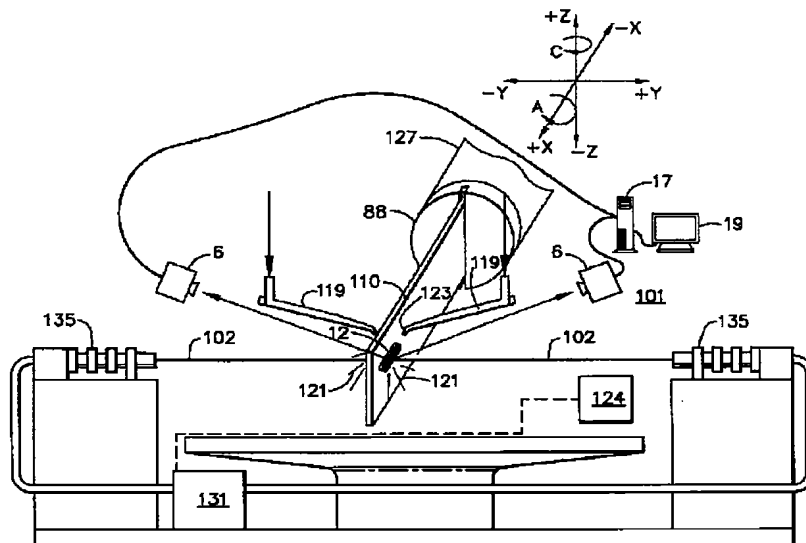
【図9】



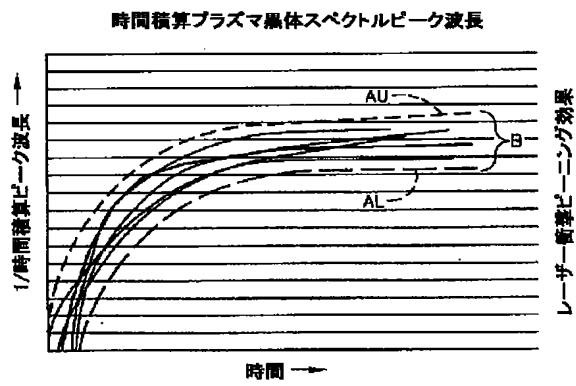
【図10】



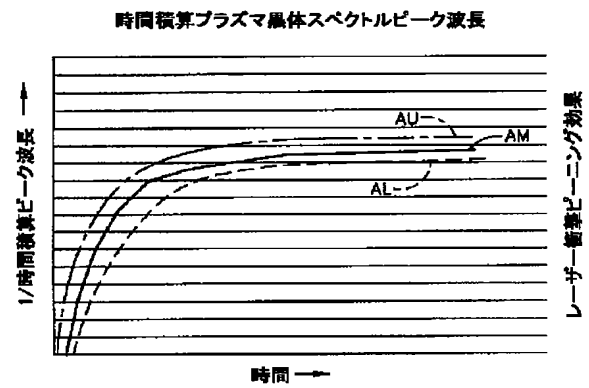
【図11】



【図12】



【図13】



【外国語明細書】

1. Title of Invention

**METHOD FOR MONITORING AND CONTROLLING LASER SHOCK
PEENING USING TEMPORAL PLASMA LIGHT SPECTRUM ANALYSIS**

2. Claims

1. A method for quality control testing of a laser shock peening process of production workpieces, said method comprising the following steps:
 - (a) firing at least one laser beam pulse from a laser shock peening apparatus on a metallic surface associated with the workpiece and forming a plasma having a duration in which the plasma causes a region to form beneath the surface, the region having deep compressive residual stresses imparted by the laser shock peening process,
 - (b) measuring a plurality of optical emissions spectrums radiated by the plasma at a corresponding plurality of times during a period of time during the duration of the plasma, and
 - (c) comparing relative distributions of energy within the spectrums to pass or fail criteria for accepting or rejecting the workpieces.
2. A method as claimed in claim 1 wherein the metallic surface is on the production workpiece and correlation is based on high cycle fatigue tests of test pieces that are essentially the same as the production piece and that were laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus.
3. A method as claimed in claim 1 wherein the pass or fail criteria is a correlation of similar relative distributions of energy within the optical emissions spectrums versus high fatigue failure data.
4. A method as claimed in claim 1 wherein:
the relative distributions of energy within the spectrums is a black body radiation peak intensity wavelength distribution with respect to time during the period of time,
the peak intensity wavelength distribution is obtained by determining a

peak intensity wavelength for each of the optical emissions spectrums, and said comparing relative distributions of energy within the spectrums comprises comparing black body radiation peak intensity wavelength data from the peak intensity wavelength distribution to the pass or fail criteria for accepting or rejecting the workpieces.

5. A method as claimed in claim 4 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data versus high cycle fatigue failure test data for accepting or rejecting the workpieces.

6. A method as claimed in claim 4 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data versus low cycle fatigue failure test data for accepting or rejecting the workpieces.

7. A method as claimed in claim 4 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data integrated over the period of time during the duration of the plasma versus high cycle fatigue failure test data for accepting or rejecting the workpieces.

8. A method as claimed in claim 7 wherein the test pieces each have a failure precipitating flaw within a laser shock peened area of each of the test pieces that was laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus.

9. A method as claimed in claim 1 wherein the metallic surface is on a metallic coupon made of a material that is the same as or is similar to that of the production workpieces.

10. A method for quality control testing of a laser shock peening process of production workpieces, said method comprising the following steps:

(a) laser shock peening a surface of the production workpiece by

firing a plurality of laser beam pulses from a laser shock peening apparatus on a surface of the production workpiece and forming a plurality of plasmas, each one of said plasmas for each of said pulses having a duration in which the plasma causes a region to form beneath the surface, the region having deep compressive residual stresses imparted by the laser shock peening process,

(b) measuring a plurality of optical emissions spectrums radiated by each plasma of at least a portion of said plasmas at a corresponding plurality of times during a period of time during the duration of the plasma, and

(c) comparing relative distributions of energy within the spectrums for each of said plasma to pass or fail criteria for accepting or rejecting the workpieces.

11. A method as claimed in claim 10 wherein the pass or fail criteria is a correlation of similar relative distributions of energy within the optical emissions spectrums versus high fatigue failure data.

12. A method as claimed in claim 10 wherein:

the relative distributions of energy within the spectrums is a black body radiation peak intensity wavelength distribution with respect to time during the period of time,

the peak intensity wavelength distribution is obtained by determining a peak intensity wavelength for each of the optical emissions spectrums, and

said comparing relative distributions of energy within the spectrums comprises comparing black body radiation peak intensity wavelength data from the peak intensity wavelength distributions to the pass or fail criteria for accepting or rejecting the workpieces.

13. A method as claimed in claim 12 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data versus high fatigue failure test data for accepting or rejecting the workpieces.

14. A method as claimed in claim 12 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data integrated over the period of time during the duration of the plasma versus high fatigue failure test data for accepting or rejecting the workpieces.

15. A method as claimed in claim 14 wherein the test pieces each have a failure precipitating flaw within a laser shock peened area of each of the test pieces that was laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus.

16. A method for quality control testing of a laser shock peening process of gas turbine engine production blades, said method comprising the following steps:

(a) firing at least one laser beam pulse from a laser shock peening apparatus on a metallic surface associated with each of the production blades and forming a plasma having a duration in which the plasma causes a region to form beneath the surface, the region having deep compressive residual stresses imparted by the laser shock peening process,

(b) measuring a plurality of optical emissions spectrums radiated by the plasma at a corresponding plurality of times during a period of time during the duration of the plasma, and

(c) comparing relative distributions of energy within the spectrums to pass or fail criteria for accepting or rejecting the production blades.

17. A method as claimed in claim 16 wherein the metallic surface is on each of the production blades and correlation is based on high cycle fatigue tests of test blades that are essentially the same as the production blades and that were laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus.

18. A method as claimed in claim 16 wherein the pass or fail criteria

is a correlation of similar relative distributions of energy within the optical emissions spectrums versus high fatigue failure data of the test blades.

19. A method as claimed in claim 16 wherein:

the relative distributions of energy within the spectrums is a black body radiation peak intensity wavelength distribution with respect to time during the period of time,

the peak intensity wavelength distribution is obtained by determining a peak intensity wavelength for each of the optical emissions spectrums, and

said comparing relative distributions of energy within the spectrums comprises comparing black body radiation peak intensity wavelength data from the peak intensity wavelength distribution to the pass or fail criteria for accepting or rejecting the production blades.

20. A method as claimed in claim 19 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data versus high cycle fatigue failure test data from the test blades for accepting or rejecting the production blades.

21. A method as claimed in claim 19 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data versus low cycle fatigue failure test data from the test blades for accepting or rejecting the production blades.

22. A method as claimed in claim 19 wherein the pass or fail criteria is a correlation of peak intensity wavelength test data integrated over the period of time during the duration of the plasma versus high cycle fatigue failure test data from the test blades for accepting or rejecting the production blades.

23. A method as claimed in claim 22 wherein the metallic surfaces of the production blades and test blades are along at least a portion of the

leading edges of the blades and the test blades each have a failure precipitating flaw within a laser shock peened area of each of the test blades that was laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus.

24. A method as claimed in claim 23 wherein the failure precipitating flaw is a notch in the portion of the leading edges of the test blades.

3. Detailed Description of Invention

BACKGROUND OF THE INVENTION

Field of the Invention

This invention relates to process monitoring methods used for quality assurance of laser surface treatment of a metallic surface and, more particularly, a method for providing quality assurance of a laser shock peening (LSP) process by measuring a spectral intensity of light emitted by a laser generated plasma over its duration.

Description of Related Art

Laser shock peening or laser shock processing, as it is also referred to, is a process for producing a region of deep compressive residual stresses imparted by laser shock peening a surface area of a workpiece. Laser shock peening typically uses one or more radiation pulses from high power pulsed

lasers to produce an intense shock wave at the surface of a workpiece similar to methods disclosed in U.S. Patent No. 3,850,698 entitled "Altering Material Properties"; U.S. Patent No. 4,401,477 entitled "Laser Shock Processing"; and U.S. Patent No. 5,131,957 entitled "Material Properties". Laser shock peening, as understood in the art and as used herein, means utilizing a pulsed laser beam from a laser beam source to produce a strong localized compressive force on a portion of a surface by producing an explosive force at the impingement point of the laser beam by the instantaneous ablation or vaporization of a thin layer of that surface or of a coating (such as tape or paint) on that surface.

Laser peening has been utilized to create a compressively stressed protective layer at the outer surface of a workpiece which is known to

considerably increase the resistance of the workpiece to fatigue failure as disclosed in U.S. Patent No. 4,937,421 entitled "Laser Peening System and Method". These methods typically employ a curtain of water flowed over the workpiece or some other method to provide a confining plasma medium. This medium enables the plasma to rapidly achieve shockwave pressures that produce the plastic deformation and associated residual stress patterns that constitute the LSP effect.

Laser shock peening is being developed for many applications in the gas turbine engine field, some of which are disclosed in the following U.S. Patent Nos.: 5,756,965 entitled "On The Fly Laser Shock Peening"; 5,591,009 entitled "Laser shock peened gas turbine engine fan blade edges"; 5,569,018 entitled "Technique to prevent or divert cracks"; 5,531,570 entitled "Distortion control for laser shock peened gas turbine engine compressor blade edges"; 5,492,447 entitled "Laser shock peened rotor components for

turbomachinery"; 5,674,329 entitled "Adhesive tape covered laser shock peening"; and 5,674,328 entitled "Dry tape covered laser shock peening", all of which are assigned to the present Assignee. These applications, as well as others, are in need of an efficient quality assurance evaluation method for production runs using laser shock peening.

Laser shock peening processes have been developed to simultaneously LSP pressure and suction sides of leading and trailing edges of fan and compressor airfoils and blades as disclosed in U.S. Patent No. 5,591,009 entitled "Laser shock peened gas turbine engine fan blade edges" and U.S. Patent No. 5,531,570 entitled "Distortion control for laser shock peened gas turbine engine compressor blade edges". Single-sided shot peened Almen strips are well known for use in the field of shot peening quality control, see U.S. Patent No. 2,620,838. However, Almen strips are not designed to provide a measure of the effect of a single laser beam impact.

The LSP process involves the use of high pulse energy, short pulse duration laser systems. The combination of high energy and short duration, as well as variations in the stability of the beam path (such as at a water/air interface), limit the usefulness of electronic measurement systems to verify the true (calibrated) energy being delivered to the component being processed.

One laser shock peening quality assurance technique that has been used is high cycle fatigue (HCF) testing of blades having leading edges which have been LSP'd and notched in the LSP'd area before testing. This method is destructive of the testpiece, fairly expensive and time consuming to carry out, and significantly slows production and the process of qualifying LSP'd components. HCF testing is a random sampling technique and is a poor statistical quality measurement. An improved quality assurance method of measurement and control of the LSP process that is a non-destructive evaluation (NDE), inexpensive, accurate, and quick is highly desirable. It is

also desirable to have an NDE quality assurance method that is relatively inexpensive and sufficiently economical to be used directly on the actual workpiece instead of indirectly on a sacrificial sampling of workpieces. LSP is a process that, as any production technique, involves machinery and is time consuming and expensive. Therefore, any techniques that can reduce the amount or complexity of production machinery and/or production time are highly desirable.

The present invention measures instantaneous spectral intensity of light emitted by a laser generated plasma over the temporal duration of a single firing of a laser used in the laser shock peening process. The invention preferably measures instantaneous light intensity of the plasma through the analysis of an instantaneous optical spectrum associated with vaporized material using optical devices such as a streak camera available from Hamamatsu of Japan.

SUMMARY OF THE INVENTION

A method of quality control for a production laser shock peening process of workpieces includes measuring and recording the instantaneous spectral light intensity over a short period during a duration of a plasma associated with vaporized material from individual laser shock peening laser shots fired during a production laser shock peening process. The recorded spectral temporal data is then analyzed to determine an instantaneous black body plasma spectrum and from that spectrum the plasma temperature over time which is then used to provide statistical control of the production laser shock peening process.

Production results from the analysis of the instantaneous optical spectrum is used to determine whether the production laser shock peening process is acceptable. One embodiment of the method compares the production results from the analysis of the instantaneous optical spectrum to a correlation of test results from the analysis of instantaneous optical spectrum

and high cycle fatigue failure based on high cycle fatigue tests of test workpieces that are the same or related to the production workpieces and that were laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus. In a more specific embodiment, each of the test workpieces has a failure precipitating flaw within a laser shock peened area of the test piece that was laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus.

In one exemplary embodiment, the production workpieces are gas turbine engine blades having airfoils and the test workpiece is a gas turbine engine blade having an airfoil with a notch in a laser shock peened patch of the airfoil wherein the notch is formed after the airfoil has been laser shock peened. The analysis of instantaneous optical spectrum for the correlation is done for each laser pulse during the formation of the multi-pulse laser shock peened patch of the airfoil test workpieces.

The correlation in one embodiment of the present invention is a statistical fit of the optical spectrum radiated by a plasma, formed by the laser firing and measured during the formation and brief life of the plasma, to the shape of the classical black body spectrum. Another embodiment employs a comparison of an analysis of production results from the individual LSP events that make up the LSP'd area on the object to the statistical fit data relating the extension of the objects fatigue life to the dimension provided by the analysis of production results to determine whether the production laser shock peening process is acceptable.

ADVANTAGES

Advantages of the present invention are numerous and include lowering the cost, time, manpower and complexity of performing quality assurance tests during laser shock peening processes. Another advantage of the present invention is that it provides an in-process quality control that

allows performing quality assurance tests during laser shock peening processes on the actual production parts and at the site of the process and in real time with respect to the processing. The present invention can help greatly reduce the amount of down-time for performing quality assurance tests during laser shock peening. The present invention replaces the tedious, costly and time consuming process of notched high cycle fatigue testing presently used for QA. The QA can be performed in tandem with an actual component or workpiece and is highly repeatable and, thus, very dependable as a QA process for laser shock peening.

The present invention has several other manufacturing advantages including measuring the laser energy at the component not raw energy of the laser prior to the beam passing through focusing and beam steering optics

and through the air/water interface that alter the focus and energy distribution of the beam and lose energy. The present invention quickly and accurately measures the qualitative effect over a period of time of each plasma. The measuring devices of the present invention may be located near the processing location and be utilized frequently with real time results. The present invention provides a very dependable and accurate QA process due in a great part to its repeatability and lack of dependance on the amount of light captured by the optics of the detector.

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

The foregoing aspects and other features of the invention are explained in the following description, taken in connection with the accompanying drawings.

The present invention provides a quality assurance method for quality control of a laser shock peening process used for production workpieces exemplified in FIG. 1 by a production fan blade 108 (more fully illustrated in FIGS. 7 and 8) having a laser shock peened patch 12. Quality assurance is typically a go or no go, pass or fail, accept or reject type of test or analysis. The method and techniques of the present invention involves quality assurance of a laser shock peening process on a production workpiece such as an exemplary aircraft turbofan gas turbine engine fan blade or other object made of a metallic material as disclosed in U.S. Patent Nos. 5,492,447, 5,674,329, 5,674,328, and 5,591,009. The method is a test which may be performed, preferably during or alternatively after, laser shock peening of each workpiece, or after or before a batch of workpieces are laser shock peened. Preferably, the present method tests every firing of the laser.

Illustrated in FIG. 1 is a laser beam 102 firing at a laser shock peened surface 154 within the laser shock peened area or patch 12 covered with an ablative coating 161 such as paint or an adhesive tape to form a coated surface 155 as disclosed in U.S. Patent Nos. 5,674,329 and 5,674,328. The paint or tape provides an ablative medium, preferably over which is a clear containment medium, which may be a clear fluid curtain such as a flow of water 121. The ablative coating 161 is ablated generating a plasma 8 with each firing and, which in turn, results in a shock wave against on the surface of the metallic material of the blade or other object that may be used for testing the laser shock peening process. Other ablative materials may be used to coat the surface as suitable alternatives to paint. These coating materials include metallic foil or adhesive plastic tape as disclosed in U.S. Patent Nos. 5,674,329 and 5,674,328. These shock waves are re-directed towards the coated surface 155 by the curtain of flowing water 121 to

generate shock waves (intense pressure waves) in the object being laser shock peened below the coated surface. The amplitude, shape, and quantity of these shockwaves determine the degree of plastic deformation incurred as a result of the LSP process, and the depth and intensity of the resultant compressive stresses. The ablative coating is used to protect the target surface and also to generate the plasma 8. In one exemplary application, the laser beam shock induced deep compressive residual stresses (in a compressive pre-stressed region 156) are generally about 50-150 KPSI (Kilo Pounds per Square Inch) extending from the laser shock peened surfaces 154 to a depth in a range of about 20-70 mils into the pre-stressed region 156.

Also illustrated in FIG. 1 is a schematic representation of an exemplary embodiment of a system 10 for measuring temporal light intensity of the plasma 8 generated during a single firing of a laser beam 102 during the laser shock peening process. The results derived from spectral/temporal light intensity data acquired using the system 10 are used to perform a quality assurance method for quality control of a laser shock peening process. A streak camera 6 or other means, such as a very fast line scan spectrometer, is used for making spectral/temporal measurements of optical spectrums (illustrated in FIG. 2) radiated by the plasma 8 at various points in a period of time PT during the duration of the plasma 8 from the firing of the laser beam 102.

The streak camera 6 records spectral light intensity data over time which is fed into a computer 17 for analysis of the data having a monitor 19 for display of the results. The computer is used to analyze the shape of the energy spectrum which represents the relative distribution of energy within this spectrum over very short time periods (potentially as short as 1 nano-second for laser pulse rise times of 5 nano-seconds) during the duration of the plasma. The generalized shape of the energy spectrum is illustrated in FIG. 2

where the optical emission spectra is shown as a light intensity graphed as a function of wavelength. The image of the optical spectrum emitted by the plasma is expected to contain both line structure and a generalized background distributed across the spectrum. The relative proportion of the energy that appears to be distributed between these two modes is dependent, in part, on the spectral resolution of the detector. The poorer the resolution, the more the line structure will be integrated into the general background. For black body radiators the spectral energy distribution of an incandescent source takes the form illustrated in FIG. 3. Whether the line structure is fully integrated or not, the energy distribution will contain a peak in the higher energy (shorter wavelength) end of the spectrum as in the case of black body radiation. That peak will be skewed toward the shorter wavelength end of the spectrum as temperature increases. In practice in one embodiment of the invention, a fit of the partially integrated spectral data to the idealized black body spectrum is used to determine an effective black body temperature throughout the duration of the plasma, which is related to the instantaneous pressure. During production runs measured optical spectrum data is compared to pre-determined optical spectrum criteria, preferably, in the form of a high cycle fatigue correlation for passing or failing the workpieces.

The pre-determined criteria are preferably based on a correlation of optical spectrum test data versus high cycle fatigue data of test versions of the workpieces that are exemplified by laser shock peened and notched test blades 109 illustrated in FIG. 9.

Referring to FIGS. 7 and 8, the production fan blade 108 includes an airfoil 134 extending radially outward from a blade platform 136 to a blade tip 138 and a root section 140 extending radially inward from the platform 136. The root section 140 has a blade root 142 connected to the platform 136 by a blade shank 144. The airfoil 134 extends in the chordwise direction between

a leading edge LE and a trailing edge TE of the airfoil. A chord CH of the airfoil 134 is the line between the leading edge LE and trailing edge TE at each cross-section of the blade as illustrated in FIG. 8. A pressure side 146 of the airfoil 134 faces away from the general direction of rotation as indicated by an arrow V and a suction side 148 is on the other side of the airfoil and a mean-line ML is generally disposed midway between the two sides in the chordwise direction.

The production fan blade 108 has a leading edge section 150 that extends along the leading edge LE of the airfoil 134 from the blade platform 136 to the blade tip 138. The leading edge section 150 includes a pre-determined first width W such that the leading edge section 150 encompasses an area where nicks and tears that may occur along the leading edge of the airfoil 134 during engine operation. The airfoil 134 is subject to a significant tensile stress field due to the centrifugal forces generated by the rotation of the fan blade 108 during engine operation. The airfoil 134 is also subject to vibrations generated during engine operation and the nicks and tears operate as high cycle fatigue stress risers producing additional stress concentrations around them.

To counter fatigue failure of portions of the blade along possible crack lines that can develop and emanate from the nicks and tears, the laser shock peened patch 12 is placed along a portion of the leading edge LE where incipient nicks and tears may cause a failure of the blade due to high cycle fatigue. The laser shock peened patch 12 is placed along a portion of the leading edge LE where an exemplary pre-determined first mode line LM of failure may start. Within the laser shock peened patch 12, at least one and preferably both the pressure side 146 and the suction side 148 are simultaneously laser shock peened to form oppositely disposed first and second laser shock peened blade surfaces 154a and 154b and pre-stressed

blade regions 156a and 156b, respectively, having deep compressive residual stresses imparted by laser shock peening (LSP) extending into the airfoil 134 from the laser shock peened surfaces as seen in FIG. 8. The pre-stressed blade regions 156a and 156b are illustrated along only a portion of the leading edge section 150, but may extend along the entire leading edge LE or longer portion thereof, if so desired.

The quality assurance method of the present invention is performed during the laser shock peening processing of the production blades 108 and is preferably performed for each laser shot as the laser shock peened patch 12 is formed. Alternatively, the QA test could also be performed on a sacrificial blade or coupon prior to and/or following the laser shock peen processing of a batch of the production blades 108 to provide data for laser shock peen process control. Preferably, the temporal measurements of optical spectrums are made for each plasma 8 formed for each firing of the laser beam 102 with the same laser shock peening processing equipment process parameters beam characteristics, and materials used for the production fan blades 108. This allows an operator on the production line to use this method to examine some or all of the production workpieces for quality assurance in real time and with a minimal impact on the overall production of the workpieces.

To provide an evaluation of the effectiveness of the laser shock peening process, a correlation is developed between the spectral/temporal characteristics of each laser shot and the spatial placement of these shots within the laser shock patch, and the fatigue life of the blades processed by this method. A test laser shock peened surface 154 for laser shock peening is used to establish the correlation. The test laser shock peened surface 154 is preferably on the same type of object as the workpiece, in this embodiment it is the test blade 109. Alternatively, a test coupon 110 of the same material and prepared or coated in the same manner as the production workpiece can

be used, as illustrated in FIG. 11. These measurements are made, preferably, in the same way during correlation laser shock peening and during production laser shock peening.

The general form of the optical emission spectrum from a laser shock peening plasma is illustrated in FIG. 2 in terms of its light intensity versus optical wave length. Specific spectral details may be captured during the duration of plasma 8 using the streak camera 6. The optical energy is shown as being divided between that emanating in the form of a discrete line structure and that emanating as a more continuous black body radiator like distribution. The relative distribution of energy between these two forms will change with temperature, pressure, and time within the plasma. The relative distribution of energy will also appear to change with changes in the spectral resolution of the detector. The poorer the resolution, the more the line structure will be integrated into the general black body like distribution. The preferred embodiment of the present invention uses fits of instantaneous spectral data from the plasma over time with the black body radiation distributions of energy with temperature, to determine the instantaneous temperature of the plasma. However, a black body like energy distribution based on spectra generated under specific process parameters and using specific sacrificial process materials could be used as well for instantaneous temperature determinations. The relative intensity of the discrete emission lines 24 could also be used in establishing plasma temperature. Note that the purposes of this patent black body radiation distribution is meant to include the various forms of black body radiation distribution discussed herein, including black body like energy distribution, actual measured black body radiation distribution, and idealized black body energy distribution.

Preferably, the discrete emission lines 24 are blocked by selectively masking the spectral image plane to restrict the analyzed spectrum to the

black body related components, as shown in FIG. 3, by the black body radiation curve 20. The discrete emission lines 24 may be filtered via a partially transmissive physical filter approximately at the spectral image plane, or computationally filtered via a computerized algorithm with the use of the computer 17 in FIG. 1. The converse is also true in that the desired individual emission lines could be selectively passed by either masking the undesired portion of the spectrum (as described above), or by narrow band pass filtering.

The entire black body like spectrum need not be acquired for determining a fit of the idealized black body energy distribution for peak temperature determination. A few measurements of the intensity of the light within some specifically selected spectral locations (wavelengths) may be sufficient for peak temperature and, therefore, pressure determinations.

FIG. 4 illustrates a series of hypothetical black body like radiation curves 20, representative of the instantaneous optical spectra emitted by the plasma, for a series of first through eleventh points in time T1-T11, respectively, during a period PT of the duration of the plasma 8. Note, that these curves represent processed spectral data or fits of that data to black body like functions, and that for each curve at each of the points in time, there is a corresponding one of first through eleventh peak intensity points P11-P111 of the optical emissions spectrums.

FIG. 5 illustrates how the plasma's black body like spectral peak intensity wavelength L and plasma temperature T and plasma pressure P change with time during the period of time PT during the duration of the plasma 8. These parametric temporal spectral functions or curves or distributions are derived from the optical emissions spectra measured by the streak camera 6. One embodiment of the present invention uses one of these parametric curves or distributions as a correlation function for the quality

assurance test during production. It is difficult to derive temperature and pressure values from the measured optical emissions spectra measured by the streak camera 6, however, black body or black body like, spectral peak intensity wavelength L , determined from fits of the spectral data to the black body or black body like functions, requires no further complicated calculations.

The determination of plasma pressure over time is a desirable relationship to use in establishing the correlation with fatigue life, but the various calculations and empirical studies needed to derive an accurate measurement of the pressure, may not be worth the cost.

The preferred correlation function or curve is a parametric time integrated function or curve for one of the three parametric functions or curves, spectral peak intensity wavelength L , plasma temperature T , or plasma pressure P over the short period of time PT during the duration of the plasma 8 in FIG. 5. The correlation function or correlation curve is derived from any one of the three parametric curves by integrating the parametric function or curve over the period of time PT during the duration of the plasma 8 to derive a time integrated function or curve.

Illustrated in FIG. 6. is an integrated spectral peak intensity wavelength curve A1 which represents a step in the analysis for one embodiment of the correlation of the present invention. The correlation tests are preferably based on the number of cycles to fatigue failure such as provided by high cycle fatigue (HCF) tests. In the exemplary embodiment herein, the notched test blades 109 are laser shock peened during which temporal measurements of optical spectrums (illustrated in FIG. 2) of the plasma 8 are made at various points, e.g. 5-20 measurements in time during the duration of the plasma, a few nano-seconds, for each firing of the laser beam 102. Then for each firing or laser beam spot an integrated spectral peak intensity wavelength curve A1 such as shown in FIG. 6 is calculated. This yields a plurality B of integrated

spectral peak intensity wavelength curves illustrated in FIG. 12 which are then used directly as or to derive a correlation curve or function such as is illustrated in FIG. 13 used during laser shock peening production runs. During laser shock peening production runs of production workpieces, the same spectral measurements and analyze are used to generate production integrated spectral peak intensity wavelength curves that are then compared to the plurality B of integrated spectral peak intensity wavelength curves or a correlation derived from plurality B curves for quality assurance using a go or no go criteria.

The test pieces or test blades 109 are preferably made the same way as the actual production fan blades 108 with a notch 152 added after the test blade 109 is laser shock peened to form the patch 12. After the plurality B of integrated spectral peak intensity wavelength curve plurality is generated or the raw spectral data from the streak camera is recorded and stored, the test blade 109 is vibrated at its first mode frequency until it fails. A number of test blades 109 or just one test blade 109 may be notched and subjected to high cycle fatigue tests to establish the correlation. The notch 152 is representative of a failure precipitating flaw and is placed in the leading edge LE about a pre-determined position of the pre-stressed blade regions 156a and 156b, respectively, after the blade is laser shock peened. Preferably, the notch 152 is also centered about a pre-determined mode line such as the first mode line LM. If it meets standards or test criteria on length of time and amplitude of the forcing function that is exciting the blade, then it is acceptable and its respective plurality B of integrated spectral peak intensity wavelength curves is used for the correlation curve during the quality assurance tests during production runs. It is contemplated that one calibration can be used for an entire production run as long as the production laser shock peening parameters do not change. An alternative embodiment provides for the correlation tests to be based on the number of cycles to fatigue failure

produced by low cycle fatigue (LCF).

The spectral analysis during laser shock peening production runs is the same as described above for the correlation runs, but not as many points in time and wavelengths must be analyzed. Several points may be analyzed using the computer 17 and displayed against a correlation on the screen 19 so that production slow down is minimal.

Illustrated in FIG. 12 is one correlation for pass or fail testing of production workpieces having a pass range or band between upper and lower limits. Variations in the laser shock peening process, such as varying laser beam fluence, may be used to establish upper and lower integrated spectral peak intensity wavelength limits AU and AL, respectively, and an integrated spectral peak intensity wavelength mean AM during the testing and development of the correlation from the plurality B of integrated spectral peak intensity wavelength curves illustrated in FIG. 12. This is then used to as the derived correlation curve or function such as is illustrated in FIG. 13 used during laser shock peening production runs. Alternatively, statistical deviations from the ideal correction curve may be analyzed and used to determine pass or fail of production workpieces. Actual data of integrated spectral peak intensity wavelength curves measured and derived from light intensity measurements made by the spectral camera 6 of plasmas during production runs are preferably displayed on the screen 19 for real time QA tests for each blade.

Illustrated in FIGS. 10 and 11 is a laser shock peening system 101 for laser shock peening the production fan blade 108. The production fan blade 108 is mounted in a fixture 88 which is attached to a five-axis computer numerically controlled (CNC) manipulator 127, commercially available from the Huffman Corporation, having an office at 1050 Huffman Way, Clover, SC 29710. The five axes of motion that are illustrated in the exemplary

embodiment are conventional translational axes X, Y, and Z, and conventional rotational axes A and C that are well known in CNC machining. The manipulator 127 is preferably used to move and position the production fan blade 108 and to effect laser shock peening "on the fly" in accordance with a laser shock peening method and of the present invention. The manipulator 127 is used to continuously move and position the blade to provide laser shock peening "on the fly" in accordance with one embodiment of the present invention. Laser shock peening may be done in a number of various ways using paint or tape as an ablative medium (see - in particular U.S. Patent No. 5,674,329 entitled "Adhesive Tape Covered Laser Shock Peening"). The same laser shock peening apparatus is used in the laser shock peening process of the patch 12 on the leading edge LE of the production blades 108 and the test blades 109.

The production fan blade 108 may be either continuously or incrementally moved, while incrementally firing the stationary high power laser beams 102 through a curtain of flowing water 121 on the coated surfaces 155, and forming overlapping laser shock peened circular spots 158. The production fan blades 108 are preferably laser shock peened the same way during production runs and HCF testing runs for the correlation. The curtain of water 121 is illustrated as being supplied by a conventional water nozzle 123 at the end of a conventional water supply tube 119. The laser shock peening system 101 has a conventional generator 131 with an oscillator 133 and a pre-amplifier 139A and a beam splitter 143 which feeds the pre-amplified laser beam into two beam optical transmission circuits each having a first and second amplifier 139 and 141, respectively, and optics 135 which include optical elements that transmit and focus the laser beam 102 on the coated surfaces 155. A controller 124 may be used to modulate and control the laser shock peening system 101 to fire the laser beams 102 on the coated surfaces 155 in a controlled manner. Ablated coating material is washed out

by the curtain of flowing water 121.

FIG. 11 illustrates an alternative to using actual or representative workpieces during both production runs and calibration runs. The patch 12 is formed on one or more test coupons 110 in at various times during the production run the blades or workpieces being produced. The same type of coupon would be used to generate the correlation curve such as at the beginning of the run after which a laser shock peened and notched blade would be tested for HCF failure to establish the correlation curves and functions illustrated in FIGS. 12 and 13.

It is important to note that the camera 6 can remain fixed just as the position of the laser beam 102 remains fixed while the manipulator 127 orients and moves the production fan blade 108. This feature is very important for the ease of use of the present invention and is, in part, due to the method using relative spectral light intensity data, particularly peak intensity wavelength.

While the preferred embodiment of the present invention has been described fully in order to explain its principles, it is understood that various modifications or alterations may be made to the preferred embodiment without departing from the scope of the invention as set forth in the claims.

4. Brief Description of Drawings

FIG. 1 is a schematic illustration of an exemplary embodiment of a system for measuring the spectral intensity over time of the light emitted by the plasma generated by a laser shock peening (LSP) process;

FIG. 2 is an exemplary graphical illustration of an optical emissions spectra from the plasma at a given point in time as measured by the system in FIG. 1;

FIG. 3 is an exemplary graphical illustration of the idealized black body radiation from FIG. 2 which is the optical emissions spectra in FIG. 2 with discrete emission lines removed;

FIG. 4 is an exemplary graphical illustration of black body radiation from several points in time as measured by the system during a period of time in the duration of the plasma in FIG. 1; and

FIG. 5 is an exemplary graphical illustration of the change in black body spectral peak intensity wavelength with two hypothetical plots of plasma temperature and plasma pressure with respect to time during the period during the duration of the plasmin FIG. 1.

FIG. 6 is an exemplary graphical illustration of the integrated spectral peak intensity wavelength with respect to time during the period during the duration of the plasma in FIG. 1, and its relationship to the magnitude of the laser shock peening effect (scale altered to fit curve).

FIG. 7 is a perspective view of the fan blade in FIG. 1.

FIG. 8 is a cross-sectional view of the fan blade taken through line 8-8 in FIG. 7.

FIG. 9 is a perspective view of a notched fan blade used in the exemplary method of the present invention.

FIG. 10 is a schematic perspective illustration of the blade in FIG. 1 mounted in a laser shock peening system in accordance with an exemplary embodiment of the present invention.

FIG. 11 is a schematic perspective illustration of a test coupon simulating the blade in FIG. 1 mounted in a laser shock peening system in accordance with an alternative embodiment of the present invention.

FIG. 12 is an exemplary graphical illustration of a plurality of integrated spectral peak intensity wavelength curves made with test data one of which is illustrated in FIG. 6.

FIG. 13 is an exemplary graphical illustration of a derived correlation curves derived from the plurality of integrated spectral peak intensity wavelength curves illustrated in FIG. 12.

PARTS LIST

- 6. streak camera
- 8. plasma
- 10. system
- 12. patch
- 17. computer
- 19. monitor
- 20. black body radiation curve
- 24. emission lines
- 88. fixture
- 101. laser shock peening system
- 102. laser beam
- 108. production fan blade
- 109. notched test blades
- 110. test coupon
- 119. supply tube
- 121. curtain of flowing water
- 123. water nozzle
- 124. controller
- 127. manipulator
- 131. generator
- 133. oscillator
- 134. airfoil
- 135. optics
- 136. blade platform
- 138. blade tip
- 139. first amplifier
- 139A. pre-amplifier
- 140. root section
- 141. second amplifier
- 142. blade root
- 143. beam splitter
- 144. blade shank
- 146. pressure side

148. suction side
150. leading edge section
152. notch
154. laser shock peened surface
154a. first laser shock peened blade surface
154b. second laser shock peened blade surface
155. coated surface
156. pre-stressed region
156a. first pre-stressed blade region
156b. second pre-stressed blade region
158. circular spots

161. ablative coating

A1 - wavelength curve
B - wavelength curve plurality

A - rotational axes
C - rotational axes

AU - upper integrated spectral peak wavelength limits
AL - lower integrated spectral peak wavelength limits
AM - integrated spectral peak wavelength mean
CH - chord
L - peak intensity wavelength
LM - first mode line
ML - mean-line
P - plasma pressure
PT - period of time
T - plasma temperature
V - arrow
W - width

T1-T11 first through eleventh points in time
PI1-PI11 first through eleventh peak intensity points

X - translational axes
Y - translational axes
Z - translational axes

LE - leading edge
TE - trailing edge

FIG. 1

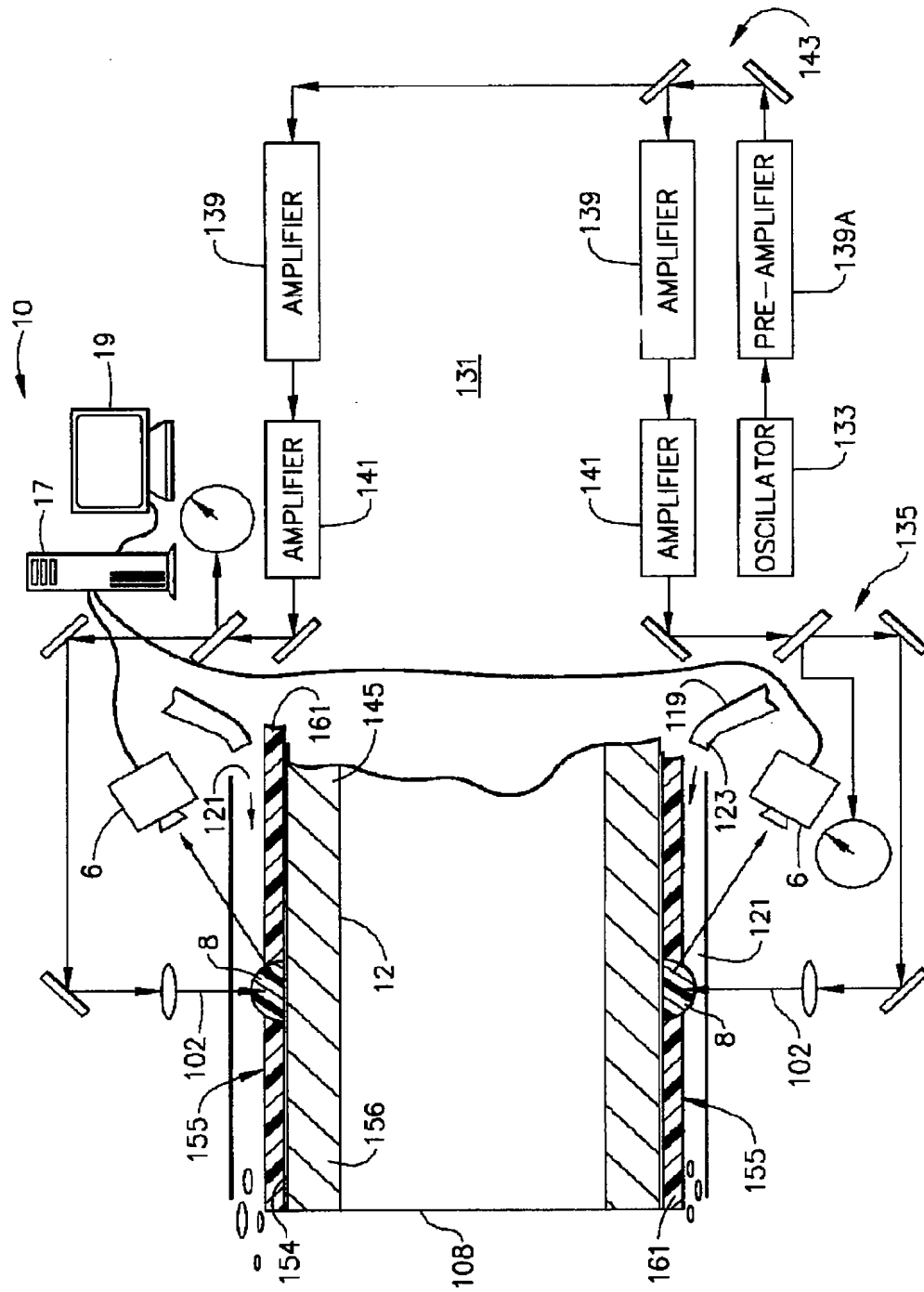


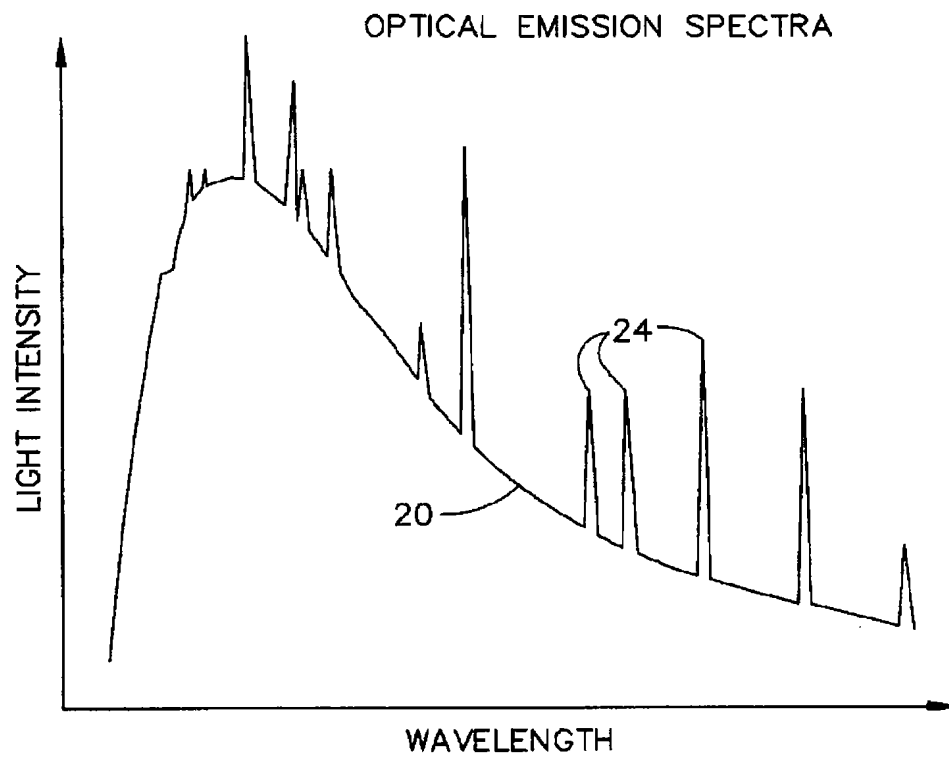
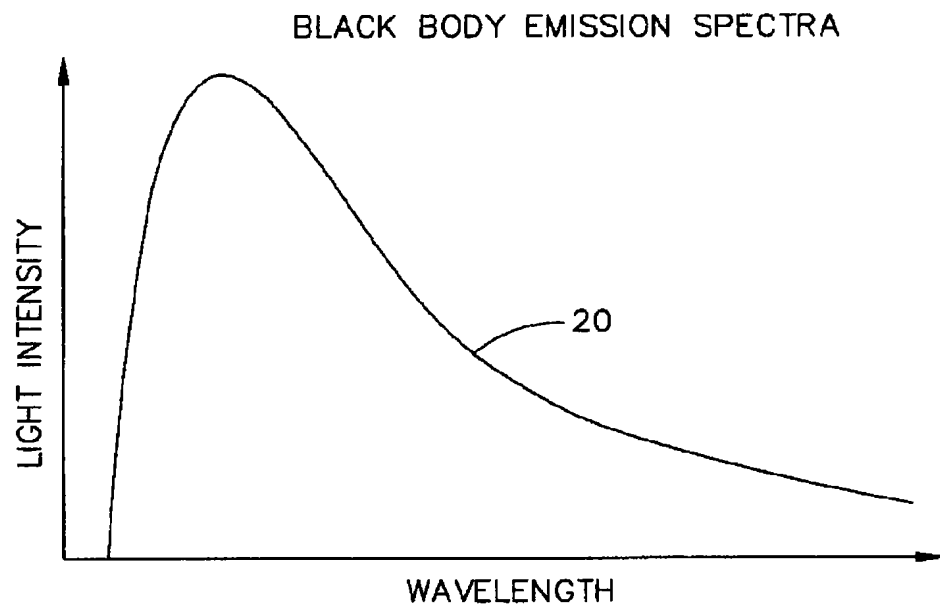
FIG. 2**FIG. 3**

FIG. 4

(BLACK BODY) EMISSION SPECTRA WITH TIME

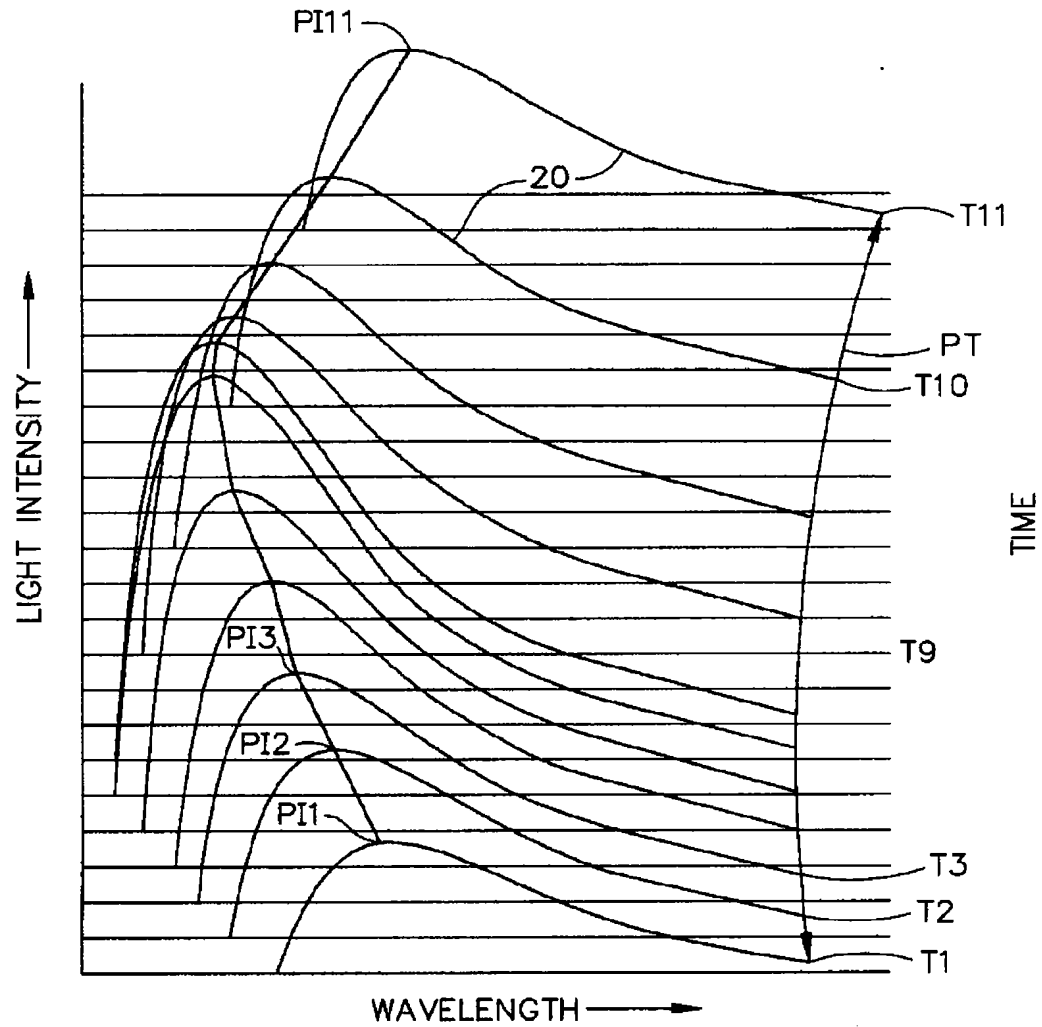
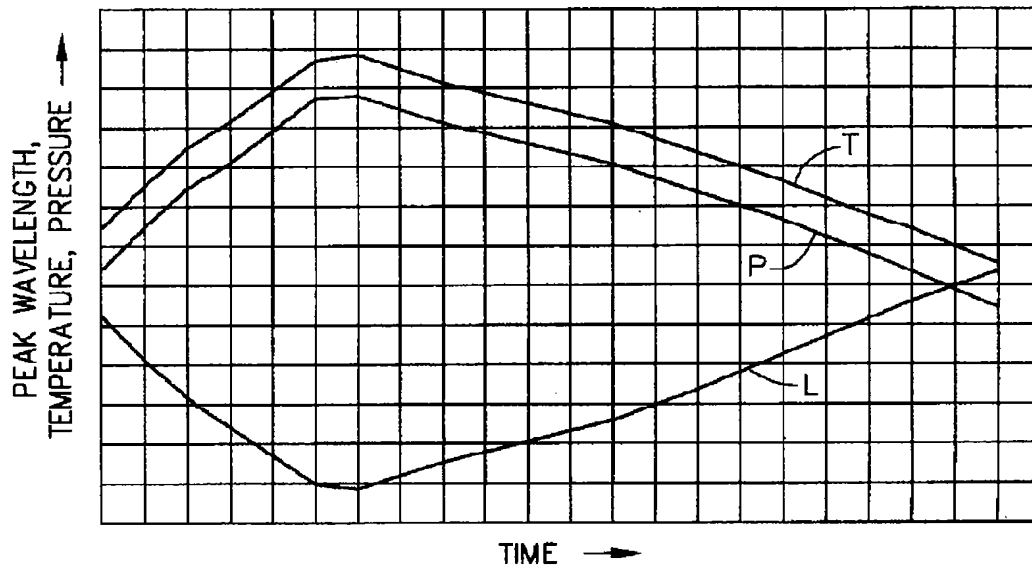


FIG. 5

CHANGE IN BLACK BODY SPECTRAL PEAK WAVELENGTH WITH
TIME RELATED TO PLASMA TEMPERATURE AND PRESSURE

**FIG. 6**

INTEGRATED PLASMA BLACK BODY SPECTRAL
PEAK WAVELENGTH OVER TIME

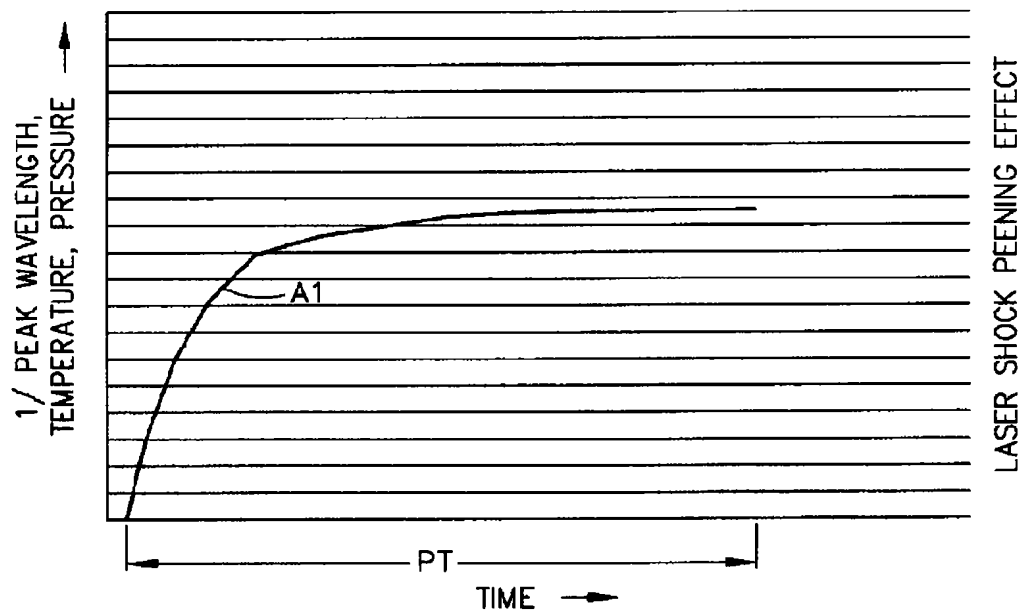


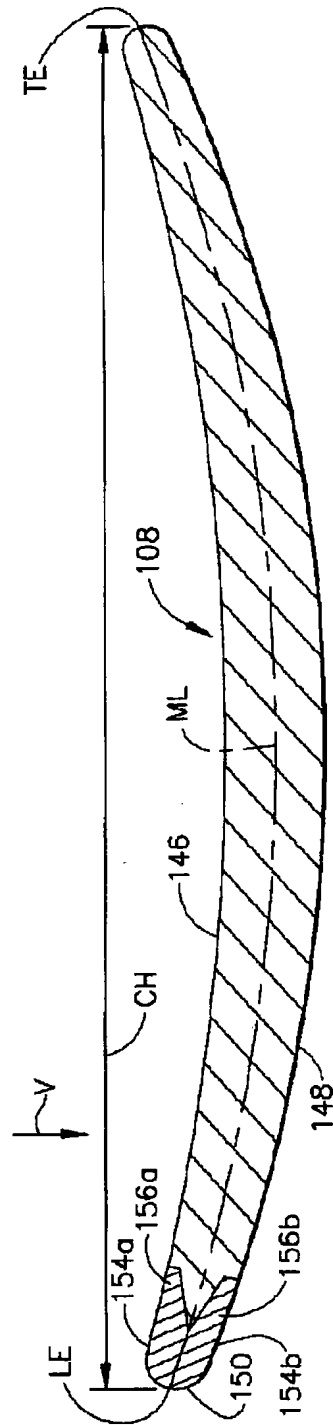
FIG. 8

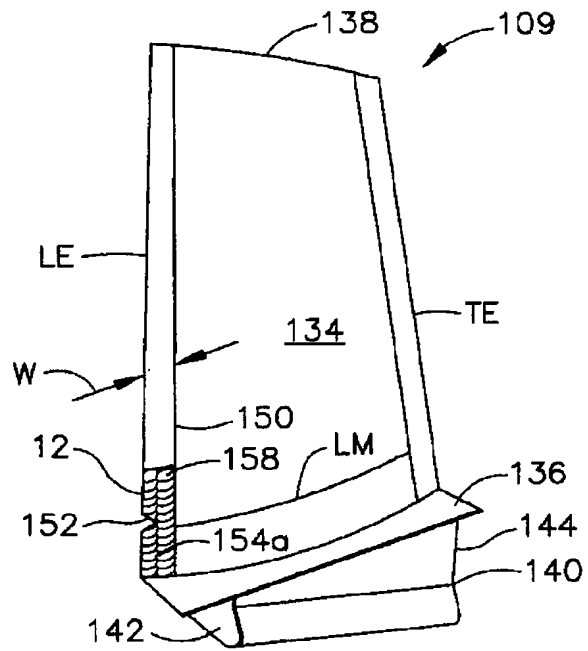
FIG. 9

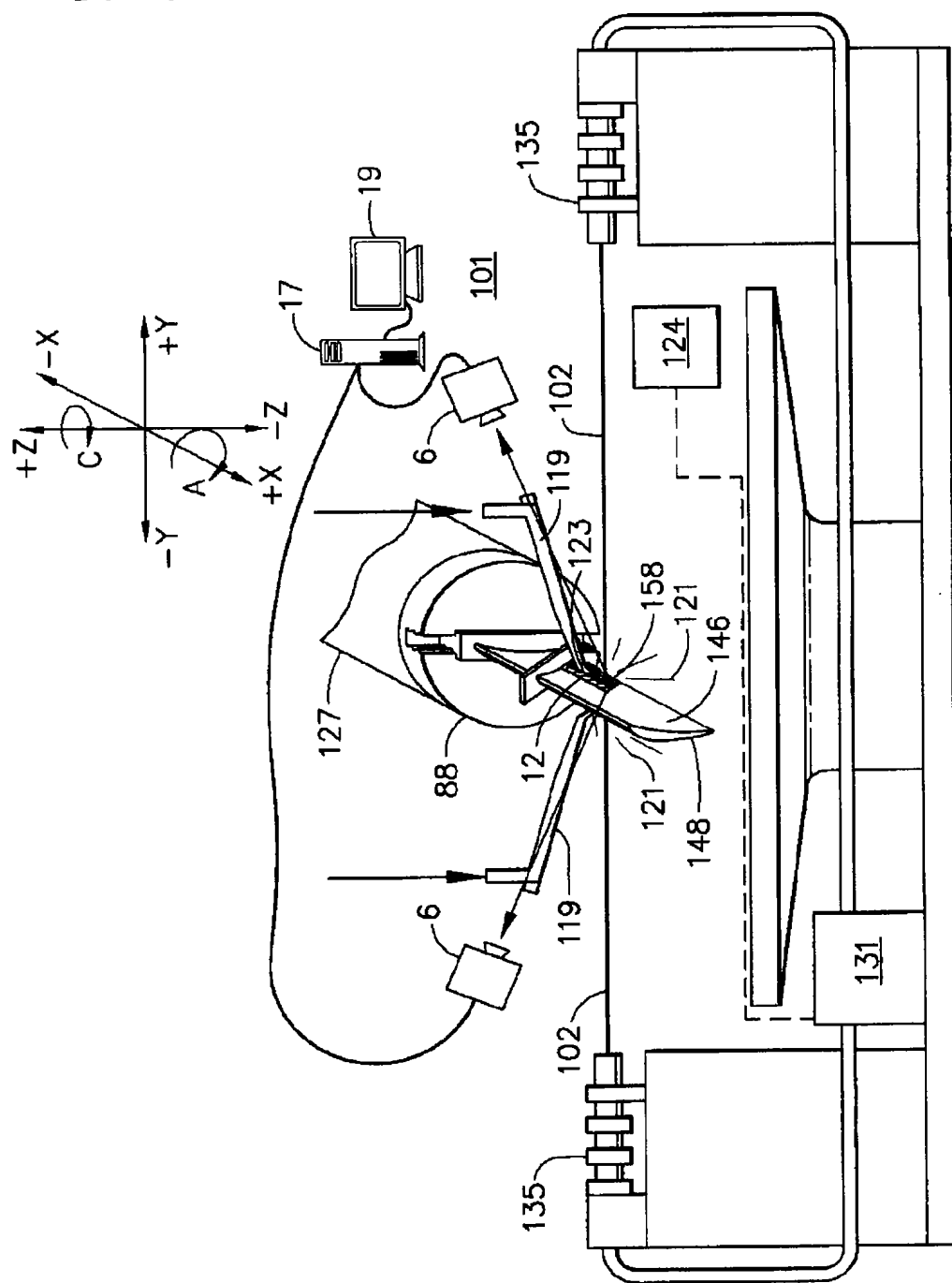
FIG. 10

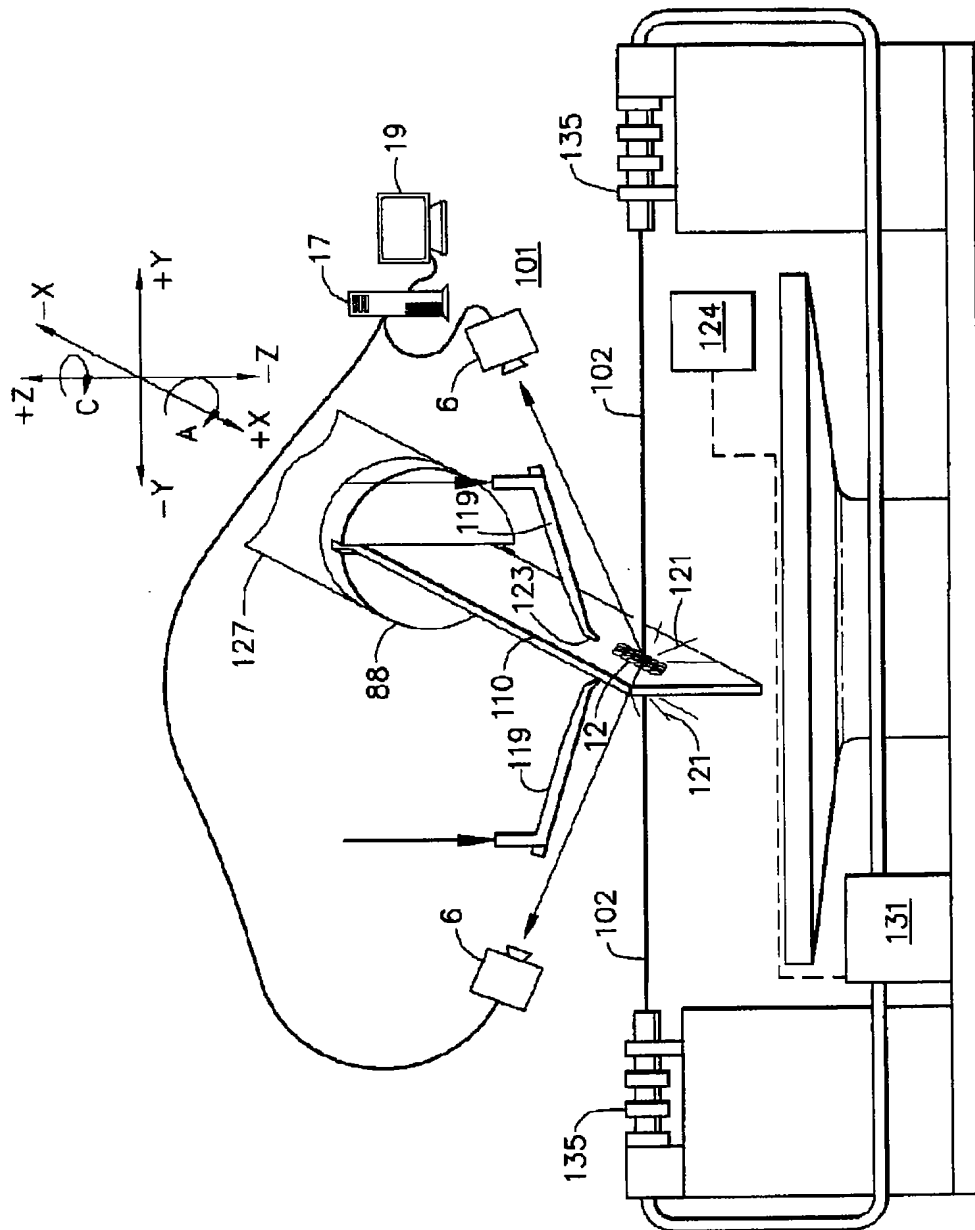
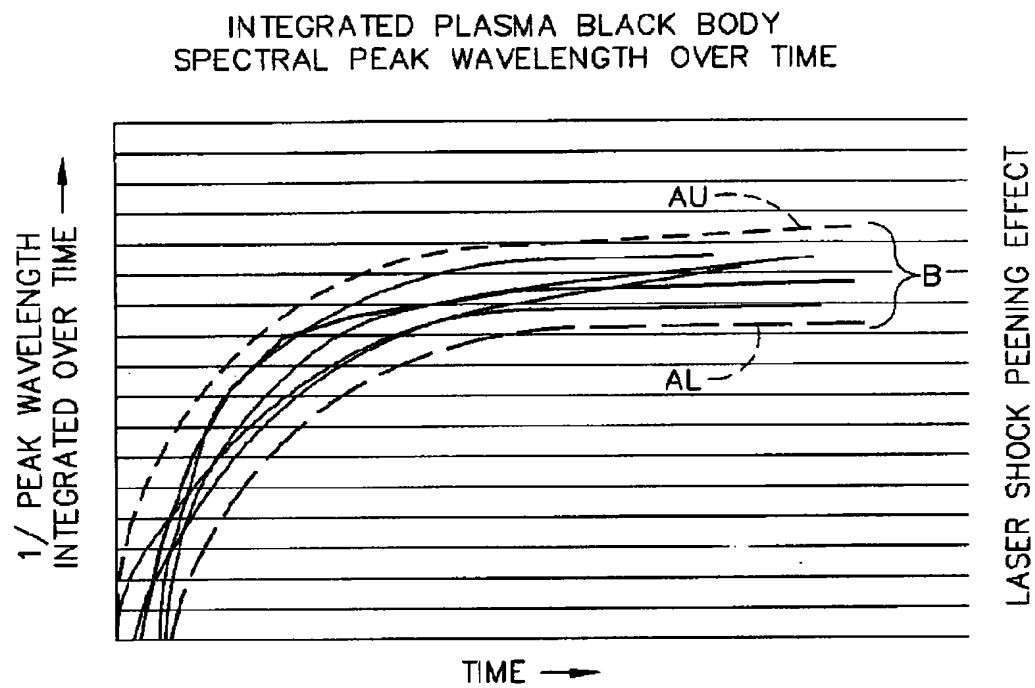
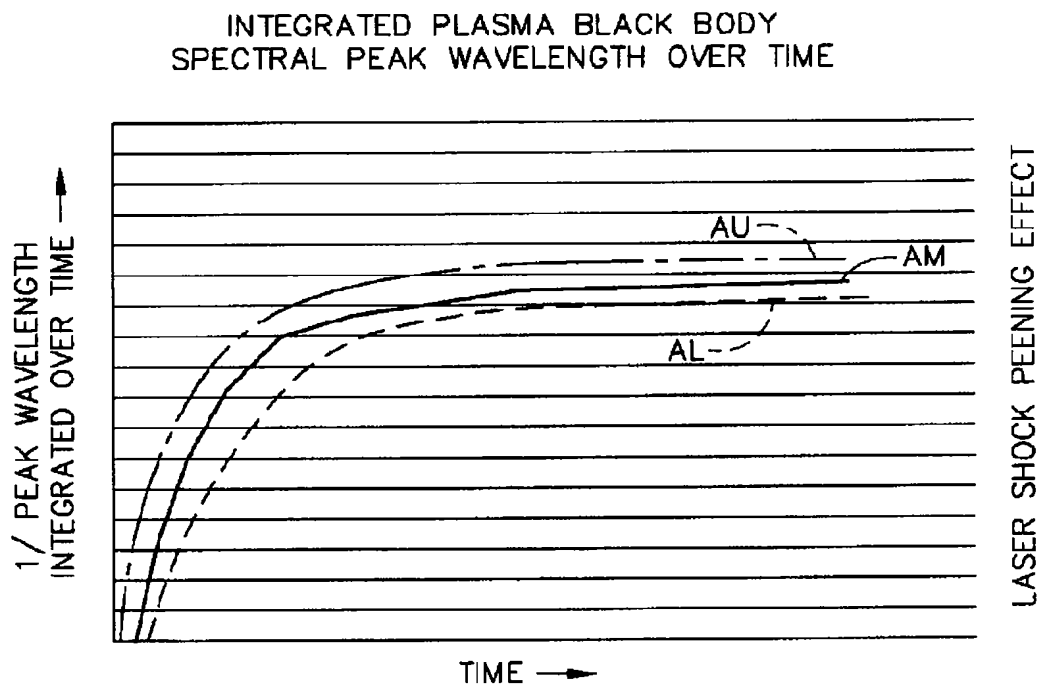
FIG. 11

FIG. 12**FIG. 13**

1. Abstract

A method for quality assurance of a laser shock peening process of workpieces includes measuring and recording or temporal light intensity data over a short period during the duration of a plasma associated with the vaporized material from laser shots fired during a production laser shock peening process. The recorded temporal data is then analyzed to obtain an instantaneous optical spectrum of the plasma and then used to provide statistical control of the production laser shock peening process. One correlation function of the present invention is based on a time integrated spectral peak intensity wavelength curve for each of the laser firings and for which a peak intensity wavelength is determined for a plurality of times during each plasma of a plurality or all of the firings.

Production results from the analysis of the instantaneous optical spectrum is used to determine whether the production laser shock peening process is acceptable. One embodiment of the method compares the production results from the analysis of the instantaneous optical spectrum to a correlation of test results from the analysis of instantaneous optical spectrum and high cycle fatigue failure based on high cycle fatigue tests of test workpieces that are the same or related to the production workpieces and that were laser shock peened in the same or similar laser shock peening apparatus.

2. Representative Drawing:

Figure 1